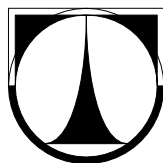


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Liberec 2011

Petr Kněbort

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Elektronické informační a řídicí systémy

**Vysokofrekvenční vlastnosti plošných vrstvených
materiálů**

High-frequency properties of multilayer materials

Bakalářská práce

Autor: **Petr Kněbort**

Vedoucí práce: prof. Ing. Aleš Richter, CSc.

Konzultant: Ing. Martin Truhlář

V Liberci 20. 5. 2011

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 20. 5. 2011

Podpis:

Poděkování

Děkuji všem, kteří se podíleli na vzniku tohoto dokumentu, zejména svému vedoucímu Prof. Aleši Richterovi za užitečné konzultace a připomínky k této práci. Dále poděkování patří panu Prof. Zdeňku Plívovi za cenné rady při návrhu vzorků a panu Ing. Martinu Truhlářovi za uvedení do problematiky měření na analyzátoru Agilent E4991A. Také děkuji firmě CUBE CZ, která dodala potřebné vzorky k měření.

Anotace

Cílem bakalářské práce je měření komplexní permitivity materiálů, které se používají pro výrobu desek plošných spojů. V práci je popsáno měření komplexní permitivity jednoduchých vzorových etalonů pomocí kapacitní metody na materiálovém analyzátoru Agilent E4991A RF při kmitočtech od 100 MHz do 1 GHz. Vzorové etalony jsou z vysokofrekvenčního laminátu, který obsahuje PTFE pro zlepšení dielektrických vlastností. Kapacitní metoda je využívána i u měření vrstvených dielektrik, u kterých zkoumám vliv vzduchu mezi jednotlivými vrstvami na měření permitivity. Dále je zde sledován i vliv jejich počtu. Jako základní materiál u vrstvených dielektrik je použit FR4, který je kombinován s vrstvami nepájivé masky a mědi.

Klíčová slova:

Desky plošných spojů, komplexní permitivita, vysokofrekvenční měření

Annotation

The aim of bachelor thesis is complex permittivity measurement of multilayer materials using for printed circuit board manufacturing. Measuring of simples etalons with the help of capacity method by material analyzer Agilent E4991A RF in range from 100 MHz to 1 GHz is described in this work. The etalons are made from high-frequency laminate with contents PTFE for dielectric properties improving. The capacitive method is used for measuring of multilayer dielectrics also. Air effect among single layers and multilayer impact on the permittivity measuring is followed. Mother board combined with layers of non-soldering mask and copper of multilayer dielectric is made from FR4.

Key words:

Printed circuit board, complex permittivity, RF measurement

Obsah

Prohlášení	3
Poděkování.....	4
Anotace.....	5
Annotation	6
Seznam použitých zkratek	8
Přehled použitých symbolů	8
Úvod	9
2 Plošné spoje	10
2.1 Vlastnosti základních materiálů	10
2.2 Základní materiály pro výrobu DPS.....	16
2.3 Technologie a materiál	18
3 Teorie měření komplexní permitivity	21
3.1 Ztráty v dielektriku	21
3.2 Měření komplexní permitivity pomocí kapacitní metody	24
4 Analyzátor pro měření komplexní permitivity	30
5 Vlastní měření.....	37
5.1 Měření jednovrstvých etalonů	37
5.2 Experimentální metoda měření vrstvených dielektrik.....	45
Závěr	54
Literatura.....	55
Seznam obrázků	56
Seznam tabulek	57
Obsah CD.....	58

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Vysvětlení
DPS	Deska plošných spojů
T_g	Teplota skelného přechodu
TMA	Termomechanická analýza
UL	Společnost zabývající se bezpečností výrobků (underwriters laboratory)
NEMA	Americké sdružení výrobců
Vf	Vysokofrekvenční
PTFE	Polytetrafluorethen (Teflon)
RCFs	Pryskyřicí potažené fólie
PPE	Polyfehylen éteru

Přehled použitých symbolů

Symbol	Veličina	Jednotka	Pozn.
J	plošná hustota proudu	A/m ²	
σ	měrná vodivost	S/m	
E	intenzita elektrického pole	V/m	
ε''	ztrátové číslo	1	$= \varepsilon' \tan \delta$
δ	ztrátový úhel	°	
$\tan \delta$	ztrátový činitel	1	
ε_0	permitivita vakua	F/m	$= 8,85418 \cdot 10^{-12}$
ε^*	komplexní permitivita	F/m	
ε_r^*	komplexní relativní permitivita	1	$= \varepsilon_r' - \varepsilon_r''$
$ \varepsilon_r^* $	absolutní relativní komplexní permitivita	1	
ω	úhlová frekvence	1/s	
τ	relaxační doba	s	
Y	admitance	S	$= 1/Z$
C	kapacita	F	
G	vodivost	S	
μ	permeabilita	H/m	
μ_0	permeabilita vakua	H/m	$= 4\pi \cdot 10^{-7}$

Úvod

S prvními náznaky desek plošných spojů se setkáváme již od konce 50. let 19. století. Tato technologie byla ze začátku využívána především armádním a leteckým průmyslem, kvůli potřebě ušetřit místo a zmenšit hmotnost obvodů. Postupně se ale dostávala stále do dalších odvětví. S touto expanzí se objevily požadavky na materiál a jeho vlastnosti, protože každý výrobce vyžaduje jiné vlastnosti a má různé požadavky. Začátek práce se zabývá základními druhy nosných materiálů desek plošných spojů a požadavky, které od nich požadujeme. Jednou ze základních vlastností, která zákazníka zajímá, je permitivita nosného materiálu DPS. V této práci se také seznámíme s materiálovým analyzátozem Agilent E4991A RF Impedance/Material Analyzer, ke kterému připojíme měřicí hlavici. Díky testovací hlavici a zařízení 16453A budeme schopni změřit komplexní permitivitu zkoumaného vzorku nosného materiálu, který vložíme mezi testovací elektrody. Cílem bakalářské práce je kromě seznámení se základními nosnými materiály DPS a již zmíněnou měřicí aparaturou, naměřit etalony různých materiálů, při kmitočtu od 0,1 GHz do 1 GHz. Dále experimentálně odměřím vrstvené materiály, pomocí kterých budu pozorovat vliv nepájivé masky a měděné vrstvy na základní materiál FR-4.

2 Plošné spoje

Deska plošných spojů, jak ji v současné době známe, musela čekat na vynalezení moderních umělých pryskyřic. Mezi tyto pryskyřice patří fenolické a epoxidové pryskyřice. Další důležitým krokem bylo využití vyztužovacích tkanin ze skelných vláken. Jak jsem se již zmínil v úvodu, první náznaky výroby desek plošných spojů se objevily v 50. letech minulého století. V počátku se tyto obvody vytvářely na jemné hedvábí. Tyto první náznaky DPS byly používány ve vysílacích a přijímacích stanicích tajných agentů za války. Dnes může pojem „deska plošných spojů“ v různých odvětvích průmyslu znamenat něco jiného. Obecně se ale dá říci, že se vždy jedná o nosnou základnu z vybraného materiálu, na které jsou nanесeny vodivé cesty z tenké měděné fólie, která je spojena s tenkou fólií z plastické hmoty. Tyto vodivé cesty se mohou nanést, nebo se použije častější způsob výroby, který spočívá v odleptání celistvé měděné vrstvy na podkladovém materiálu. Deska může být jednostranná, oboustranná nebo v současné době i vícevrstvá. U vícevrstvých desek se vodivé cesty vytvářejí i uvnitř materiálu. V DPS jsou vytvořeny otvory, které slouží pro vývody součástek. Tyto otvory mohou sloužit i jako propojení jednotlivých vrstev mezi sebou. V automobilovém průmyslu se používají i takzvané ohebné plošné spoje. Moderní ohebné plošné spoje se skládají z tenké měděné fólie, která je spojena s tenkou fólií z plastické hmoty. V některých případech může být umístěna i mezi dvěma fóliemi.

2.1 Vlastnosti základních materiálů

Pokud se chceme seznámit s dnes používanými materiály pro výrobu DPS, musíme se seznámit s vlastnostmi, které od nich vyžadujeme. Existuje mnoho vlastností, které nás na materiálu zajímají. Proto je pro přehlednost rozdělím do 4 kategorií.

1. Tepelné
2. Fyzické
3. Mechanické
4. Elektrické

Tepelné, fyzické a mechanické vlastnosti

Mezi dvě nejsledovanější a nejdůležitější vlastnosti patří teplota skelného přechodu (T_g) a koeficient tepelné roztažnosti (CTE).

Teplota skelného přechodu

Tato teplota uvádí, při jaké teplotě lze daný materiál deformovat. Deformace materiálu je možná díky jeho měknutí, které je způsobeno změnami v molekulárních vazbách. Z toho vyplývá, že tato teplota je pro nás obzvlášť důležitá, protože při ní dochází ke změně fyzikálních vlastností.

Koeficient tepelné roztažnosti

Tento koeficient nám říká, jaké změny ve fyzických rozměrech proběhnou v materiálu v reakci na změnu teploty. Deformace u materiálů vyztužených tkaninou ze skleněných vláken se liší v jednotlivých osách. Jev je způsoben nesouměrností použité výztuže. Délka a šířka plošného spoje je dána parametrem roviny x/y . Osa kolmá na takto vzniklou rovinu je osa z . Teplotní roztažnost lze měřit pomocí termomechanické analýzy (TMA). Metoda TMA využívá zařízení, které zjišťuje rozměry při různých teplotách. Parametr CTE v ose z je důležitý při vytváření děr. Je to dáno tím, že vzniklé díry v DPS prochází osou z a případné deformace základního materiálu způsobují deformaci těchto otvorů a mohou způsobit poškození mědi v otvoru. Deformace mohou vyvolat pnutí mědi na povrchu DPS a tím způsobit její popraskání. U parametru x/y musíme dát pozor, aby při osazování DPS součástkami nebyl tento parametr příliš rozdílný než u použitých součástek, protože by mohlo dojít k oddělení součástky při náhlé změně teplotní podmínky. Pro lepší představu Tab. 2.1 udává parametry T_g a deformace v ose z a parametr x/y CTE.

Tab. 2.1: Teplota skelného přechodu a koeficient tepelné roztažnosti

Materiál	Tg(°C)	Deformace v ose z (% od 50 do 260°C)	x/y CTE (ppm/°C od -40 do 125°C)
FR-4 epoxy	140	4,5	12-16
FR-4 vyztužená	155	3,7	12-14
High Tg FR-4 epoxy	180	3,7	10-14
Kyanát ester	250	2,7	11-13
Polyimid	250	1,75	12-15
APPE	170	3,0	14-18

Čas potřebný k delaminaci

Čas potřebný k delaminaci určuje čas, jak dlouho bude daný materiál odolávat vzniku puchýřů nebo delaminace při určité teplotě. Způsob jak zjistit tento parametr spočívá v použití termomechanického analyzátoru, ve kterém vzorek zahřejeme na stanovenou teplotu. Nejběžněji používaná teplota je 260 °C a je označována jako T260. Test probíhá i za jiných teplot např. 280 °C nebo 300 °C. V tabulce Tab. 2.2 je srovnání tohoto testu pro některé základní typy materiálů. Hodnoty ale musíme brát s rezervou, protože každý výrobce vyrábí daný materiál trochu jinak a tak neplatí obecně.

Tab. 2.2: Hodnoty vybraných materiálů zjištěných při testu T260

Materiál	T260 (min.)
FR-4 epoxidové	4-12
FR-4 vyztužená	13
High Tg FR-4 epoxidové	4-30
Kyanát ester	30+
Polyimid	30+
APPE	30+

Teplota rozkladu

Při vyhodnocování tohoto parametru se udává teplota, při které je 5 % hmotnosti ze zkoumaného vzorku ztracena vlivem tepelného rozkladu. Hodnoty několika materiálů jsou v Tab. 2.3.

Tab. 2.3: Teplota rozkladu u různých materiálů

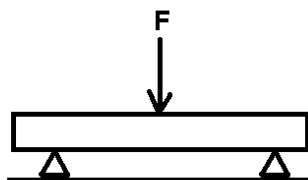
Materiál	Teplota rozkladu (°C při ztrátě 5 % hmotnosti)
FR-4 epoxy	290-310
FR-4 vyztužená	317
High Tg FR-4 epoxy	300-330
Kyanát ester	376
Polyimid	389
APPE	360

Měď a pevnost v loupání

Při výrobě DPS se jako měděná fólie používá elektrolytická měď s čistotou 99 %. V praxi se setkáme s tloušťkou mědi udávanou v anglosaských jednotkách, která vyjadřuje hmotnost mědi v uncích vztaženou na čtverečnou stopu. Nejčastěji se používá materiál 1 oz/ft². Tato hodnota odpovídá tloušťce fólie 35 μm a používá se pro konstrukci velmi jemných spojů. Další častá hodnota je 18 μm což odpovídá 0,5 oz/ft². Fólie o tloušťce 70 μm se používá pro běžné aplikace v automobilovém průmyslu kvůli nárokům na otřesy. Pevnost v loupání se udává jako síla na jednotku šířky, která je zapotřebí k odloupení vodiče od základního materiálu.

Pevnost v ohybu

Pod touto vlastností se skrývá velikost zatížení pro daný materiál, které musí vydržet bez popraskání. Materiál je podpírán na koncích a zatěžuje se v jeho středu, jak je ukázáno na Obr. 2.1.



Obr. 2.1: Znázornění testu pevnosti v ohybu

Vliv vody a absorpce vlhkosti

Schopnost materiálu odolávat vodě a vlhkosti je důležitý parametr, který u materiálů pro výrobu DPS vyžadujeme. Tento parametr totiž významným způsobem ovlivňuje spolehlivost celého obvodu. Při této metodě se zkoumá, kolik vody materiál absorbuje. Nejdříve se laminát, který je pokrytý mědí odleptá a nechá se vyschnout v peci při rozsahu teplot od 105 °C do 110 °C po dobu 1 hodiny. Poté se nechá vychladnout v prostředí bez vlhkosti a zváží se jeho počáteční hmotnost. Pak se měřený vzorek ponoří do destilované vody o teplotě 23 °C. Vzorek tam zůstane po dobu 24 hodin a následně se znovu zváží. Změna hmotnosti v procentech je v

Chemická odolnost

I tato vlastnost je pro nás důležitá, protože při samotné výrobě se materiál dostává do kontaktu s různě agresivními látkami. Mezi obvykle používané metody na zjištění chemické odolnosti patří opakovaná absorpce metylenchloridu. Měření je podobné jako u měření absorpce vody. Měřené vzorky jsou vystaveny rozpouštědlu a pak je vážena jejich hmotnost. Standardní postup je že se zbaví kovového pláště a pak se nechají vysušit v troubě při teplotách 105 °C až 110 °C po dobu 1 hodiny. Poté následuje počáteční měření váhy. Po změření se nechá vzorek v metylenchloridu po dobu 30 minut při teplotě 23 °C. Po uplynutí této doby se nechá vzorek oschnout 10 minut a poté se zváží. Tab. 2.4 udává změnu hmotnosti vzorku po dokončení této zkoušky.

Tab. 2.4: Změna celkové hmotnosti po testu na chemickou odolnost

Materiál	Odolnost proti metylenchloridu [%]
FR-4 epoxy	0,7
FR-4 vyztužená	0,42
High Tg FR-4 epoxy	0,7
Kyanát ester	0,32
Polyimid	0,41

Hořlavost

Vlastnosti pro hořlavost jsou dány podle Underwriters laboratories (UL). Jsou označovány tři kategorie, podle kterých musí materiál splňovat dané normy. Ty jsou:

94-V-0 : Vzorek se musí uhasit do 10 sekund po každém vystavení plameni. Celkový čas hoření musí být menší než 50 sekund po 10 opakování. Ze vzorku nesmí odkapávat hořící částice nebo nesmí probíhat žhnoucí spalování materiálu po uplynutí 30 sekund po druhém testu.

94-V-1: Vzorek se musí uhasit během 30 sekund po každém vystavení plamene a to po celkové době spalování menší než 250 sekund. Ze vzorku opět nesmí odpadávat hořící částice nebo probíhat žhnoucí spalování déle než 60 sekund po druhém vystavení plamene.

94-V-2: Vzorek se musí uhasit během 30 sekund po zapálení a po celkové době vystavení plameni 250 sekund po 10 vystavení plameni. Ze vzorku mohou odpadávat žhnoucí částice a pálení může probíhat krátce. Žhnoucí spalování ale musí skončit do 60 sekund.

Elektrické vlastnosti

Dielektrická konstanta

Dielektrická konstanta může být chápána jako poměr kapacity kondenzátoru s dielektrickým materiálem vzhledem ke kondenzátoru, který má jako dielektrikum vzduch. Je to schopnost materiálu zachycovat elektrickou energii. Zde musím upozornit, že dielektrická konstanta není vždy konstantní a to hlavně při změně frekvencí. Samu konstantu ovlivňuje kromě složení materiálu teplota a vlhkost, které při měření musím brát v úvahu.

Ztrátový činitel

Jedná se o poměr ztrátového výkonu vyjádřeného ve W na ekvivalentním odporu, ke ztrátovému výkonu na kondenzátoru, s daným dielektrikem. Více v kapitole 3.2.

2.2 Základní materiály pro výrobu DPS

Pokud bychom chtěli základní materiály nějak jednoduše rozdělit, tak bychom je mohli rozdělit na organické materiály. Organické materiály jsou velmi vyhledávané kvůli svým dobrým mechanickým vlastnostem, snadným zpracováním a přijatelnou cenou. Druhou skupinou jsou anorganické materiály, které se využívají ve speciálních aplikacích a jsou neohebné.

Organické materiály na základě fenolických pryskyřic

Materiály, které jsou na základě fenolických pryskyřic, vykazují velmi dobré elektrické vlastnosti a mají velmi příznivou cenu. Důvodem jejich rozšíření je právě jejich cena. Základní materiál je umístěn mezi měděnými fóliemi a impregnuje se ve vakuu fenol-formaldehydovou pryskyřicí. Základní deska vznikne tak, že při stoupajícím tlaku a teplotě dojde k vytvoření kovalentních příčných vazeb mezi řetězcí molekul. Procentuální obsah pryskyřice se pohybuje mezi 35 % až 58 %. Maximální hodnota pryskyřice je důležitá kvůli mechanickým vlastnostem. Při jejím překročení se materiál stává tvrdším a křehčím, což způsobuje problémy při výrobě DPS hlavně při vrtání a mechanickém opracovávání. Při samotné výrobě se přidávají prvky pro zlepšení mechanických vlastností. Vyrábějí se tedy materiály s různou tvrdostí. Americké sdružení výrobců (NEMA) udává základní materiály vyrobené z fenolických pryskyřic na základě jejich tvrdosti. Mezi ně patří následující materiály:

XX – Základní materiál je tvrzený papír s obsahem pryskyřice 35 %. Tento materiál se vyznačuje velkou křehkostí, a proto se dnes již moc nevyužívá.

XXP – Tento materiál je stejná jako XX, ale je razitelný za zvýšených teplot pohybujících se v rozmezí 93 °C až 121 °C.

XXX – Opět tvrzený papír, ale poměr pryskyřice se zvýšil na 58 %. Má dobrou rozměrovou stabilitu a používal se pro radiové frekvence.

XXXXP - Stejný jako XXX, ale je razitelný za zvýšené teploty. Jeho použití je pouze do 10 MHz.

XXXPC- Tento materiál je razitelný při nízkých teplotách (21 °C – 49 °C) a má menší navlhavost.

FR2 – Velmi zjednodušeně se tento materiál skládá z několika vrstev papíru, který je napuštěn fenolickou pryskyřicí, ale je nehořlavý. Tento materiál má dobré vlastnosti. Jeho náklady na výrobu jsou velmi nízké vzhledem k jeho vlastnostem. Proto se využívá hlavně v drobné elektronice. Jako drobnou elektroniku beru kalkulačky, hračky a další. U nich není vyžadována velká rozměrová stabilita a nemají vysoký výkon.

Organické materiály na bázi epoxidové pryskyřice

V současné době je to nejvíce rozšířený druh. Zvolení dobrého typu pryskyřice je pro daný materiál základní, a proto vhodný výběr zaručuje dobré mechanické, elektrické a fyzikální vlastnosti. Tato kritéria výborně splňují epoxidové pryskyřice. Hlavním důvodem jejich úspěchu je nesporně ekonomická stránka. Náklady na výrobu jsou nízké oproti vysokovýkonným pryskyřicím. Dnes je velmi používána epoxidová pryskyřice Epoxy, která vzniká z reakce epichlorhydrinu a bisfenolu A. Ten se přidává kvůli odolnosti proti ohni.

FR-4 – Patří mezi nejvíce využívané materiály pro výrobu DPS. Skládá se z tkaného skleněného vlákna impregnovaného epoxidovou pryskyřicí nebo její směsí. Nejběžnější vyráběná varianta má Tg od 130 °C do 140 °C, nebo v rozmezí od 170 °C do 180 °C. Takovéto hodnoty jsou dostačující pro běžné provozní podmínky v průmyslu. Hodnota Tg je ovlivňována jak procentem pryskyřice, tak vhodným přidáním příměsí. Právě velký rozsah variant a jejich snadná výroba je důvodem, proč je tak rozšířený.

Ostatní organické materiály

V této podkapitole uvedu několik druhů materiálu, které se využívají pro výrobu DPS.

Kyanát ester – Díky této sloučenině lze Tg posunout až do 250 °C. Jeho použití je vhodné pro vysokorychlostní aplikace. Využívá se ve vojenských a speciálních aplikacích.

Polyéter – Využívá se v bezdrátové technice a tam, kde jsou vyžadovány nízké ztráty.

PTFE – V široké veřejnosti je znám pod názvem teflon. Vzhledem k jeho dobrým elektrickým vlastnostem se využívá pro V_f aplikace. Jeho hlavní nevýhodou je jeho cena. Mnohdy je tento problém řešen tak, že se z PTFE vyrobí jen část obvodu a zbytek je z jiného materiálu. Takovýto postup je především u vícevrstevných desek kde jedna vrstva je z PTFE a ostatní jsou z jiného materiálu.

Anorganické materiály

Anorganické materiály se využívají ve speciálních aplikacích, kde vyžadujeme nízkou navlhavost, vysokou chemickou odolností. U těchto materiálů je potřeba dát pozor na problematiku mechanického pnutí. Mezi základní materiály patří korundová keramika, beryliová keramika a aluminium-nitrid AlN.

2.3 Technologie a materiál

Hlavní důvody výběru dielektrika pro výrobu DPS závisí na schopnostech výrobce a konkrétních potřebách výrobce. Z mechanického hlediska můžeme lamináty a pregely rozdělit podle toho, zda jsou posílené nebo neposílené. Vyztužené materiály jsou obecně lepší v rozměrové stabilitě a proto, mají nižší CTE a jsou méně citlivé na tepelné přetěžování. Neposílené materiály mají velmi často nižší dielektrickou konstantu a mohou být fotoexpozikovány.

Mědi plátované a neplátované dielektrické materiály

Mědi plátované materiály se ve velké míře využívají při výrobě slepých cest. Materiály mohou opět zesílit nebo nezesílit. Vyztuzit lze tkané a netkané materiály nebo aramid, sklo atd. Materiál FR-4 je pro svou dostupnost používán pro vytváření mikrocest pomocí laseru. Podmínka pro využití tohoto materiálu je taková, že pokud je vyztužená tkanými skelnými vlákny, musí mít maximální tloušťku 1080 μm. Pokud by vrstva skla byla větší, tak by byla obtížně odpařovatelná laserem. Mědi plátovaný základní materiál produkuje více odpadu a má vyšší náklady kvůli svému subtraktivnímu charakteru pořadí při výrobě. Další nevýhodou může být, pokud mají být požadované otvory menší jak 75 mikrometrů. Pokud bychom pro tyto průměry použili mědi plátované materiály, může dojít k uzavření

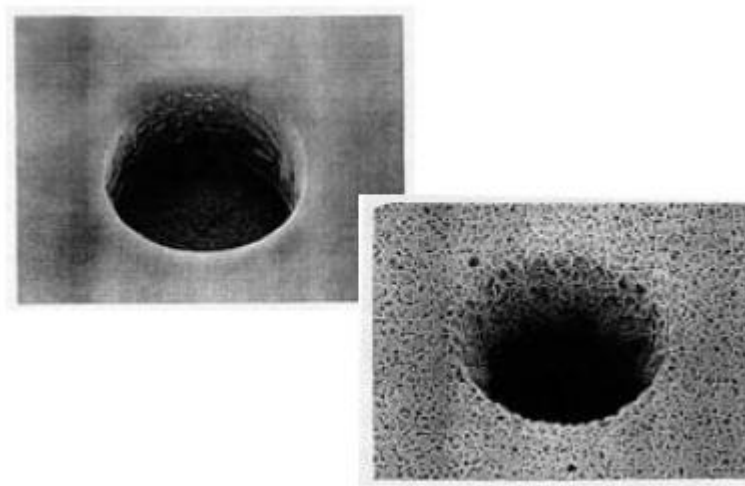
cesty bez dostatečného galvanického pokovení na dně z důvodu zvýšení poměru stran vlivem základu mědi.

Nevyztužené dielektrické materiály

Pryskyřicí potažené fólie (RCFs) jsou běžně používané materiály pro vytváření mikrocest u vícevrstevných desek. Základní epoxidem potažené fólie jsou nejčastěji používané a mají podobné výkonové vlastnosti jako FR-4, ale nemají E-skleněné výztuže. Pokud požaduje dobrou integritu vybudovaných struktur a nízkou dielektrickou konstantu s malým rozptylovým faktorem použijeme PPE. Jinou alternativou je využití přísad, které jsou schopné galvanického pokovení pryskyřice a použití mědi jako přepravce galvanizace a následnou možností odstraněním laserem. Tato metoda může být za pomoci přísad upravena tak, aby měděná fólie byla použita jako obětní přepravce. Pro výrobce to pak znamená, že po laminaci musí nechat chemicky vyleptat všechnu měď. To umožňuje lepší účinnost laseru a možnost vytváření jemnějších cest.

Nekrytá nevyztužená fotoexpozice dielektrických materiálů

Materiál chemických možností této skupiny patří směsi epoxidů, polyenbóru a další. Mohou být použity jako suchý, nebo mokrá film. Mám negativní, nebo pozitivní zobrazení a mohou být rozpustné, nebo vyvolatelné. Většina zákazníků požaduje přepravu mědi s černým oxidem, nebo konverzním povlakem, který chrání měď při přepravě. Většina těchto materiálů na trhu jsou buď epoxidy, nebo založeny na novo-laku z důvodu dobrého Tg a dobrého pokovení. Většinou poskytují adhezní hodnoty mědi nejméně 1,1 kg/cm při tloušťce mědi 25 μm . Používají se pouze bezpečná rozpouštědla, u kterých není známo, že by vlivem dlouhé expozice vedli ke zdraví škodlivým vlivům. Obrázek ukazuje vzhled mikrocesty před a po narušení povrchové vrstvy.



Obr. 2.2: Povrch kolem díry před a po povrchové úpravě [1]

Výhodou pro fotoexpozici materiálů je ta, že vytváření velkého množství cest je stejně dlouhé jako při vytváření malého počtu cest. Proto je při velkém množství cest v současné době nejvíce ekonomicky výhodná. Protože jsou materiály nevyztužené, mohou cesty rychle a snadno vrtat.¹

¹ Při vypracování kapitoly jsem využil literaturu [1] a [2]

3 Teorie měření komplexní permitivity

3.1 Ztráty v dielektriku

Ke ztrátě elektromagnetické energie v dielektriku dochází vlivem působení nestacionárních pochodů uvnitř dielektrika. Celkové ztráty v dielektriku jsou dány součtem jednotlivých fyzikálně odlišných ztrát [4].

Vodivostní ztráty

V odborné literatuře jsou často označovány jako Joulovy ztráty a vznikají při střídavém i stejnosměrném napětí. Ztráty vznikají následkem srážek volných nosičů náboje s kmitajícími částicemi, které tvoří strukturu dané látky. Elektronů tuto předávanou energii získaly urychlením v elektrickém poli. Proud, který protéká materiálem, je dán Ohmovým zákonem

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3.1)$$

Ztráty, které vznikají v materiálu, mohu vyjádřit vzorcem [5]:

$$P = \int_v \mathbf{J} \mathbf{E} dV = \int_v \sigma E^2 dV \quad (3.2)$$

Polarizační ztráty

Tyto ztráty vznikají za předpokladu, že se mění elektrické pole v důsledku šíření elektromagnetické vlny dielektrikem. Hlavním parametrem, který určuje polarizační ztráty, je imaginární část komplexní permitivity ϵ'' .

Při popisu ztrát v dielektriku se nejčastěji využívá těchto veličin:

Ztrátový činitel $\tan \delta$

Ztrátový úhel δ

$$\text{Ztrátové číslo} \quad \varepsilon'' = \varepsilon' \tan \delta$$

Pro popis ztrát se v praxi využívají relativní permitivity, které jsou závislé na frekvenci. Ve ztrátovém dielektriku dochází k fázovému zpoždění vektoru \mathbf{D} za vektorem \mathbf{E} . Díky této vlastnosti je jasné, že permitivita je komplexní veličinou. V literatuře bývá označována jako ε^* .

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (3.3)$$

Kde $\varepsilon'(\omega)$ představuje reálnou složku komplexní permitivity a nazývá se vlastní. Často je označována i jako skutečná relativní permitivita. Vliv polarizačních ztrát můžeme vyjádřit ztrátovým úhlem δ :

$$\delta = \arctan \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (3.4)$$

Nebo pomocí ztrátového činitele $\tan \delta$, který můžeme popsat rovnicí:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (3.5)$$

Ztrátové číslo můžeme vyjádřit jako:

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \tan \delta \quad (3.6)$$

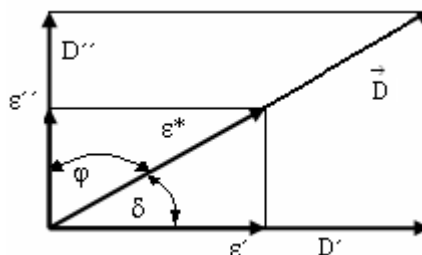
V praxi výrobce udává relativní permitivitu, pro kterou platí všechny předchozí vztahy a lze ji vyjádřit rovnicí:

$$\varepsilon_r^* = \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_0} \quad (3.7)$$

Většinou se uvádí její modul, pro který platí následující rovnice:

$$|\varepsilon_r^*| = \sqrt{\varepsilon_r'^2 + \varepsilon_r''^2} \quad (3.8)$$

Vztah mezi reálnou a imaginární složkou permitivity je vidět na Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Vektorový diagram komplexní permitivity a elektrické indukce

Komplexní permitivitu lze vyjádřit pomocí Debyeových rovnic, které vychází ze vztahu:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega \cdot \tau} \quad (3.9)$$

Část ε_s vyjadřuje tzv. statickou permitivitu pro frekvenci 0 Hz a ε_∞ , který zastupuje tzv. optickou permitivitu, která nastane pro frekvenci blíží se ∞ . Doba ustálení systému je označena jako τ . Někdy je tato doba označována jako relaxační. Pokud chceme vyjádřit ztráty, musíme rovnici rozdělit na reálnou a imaginární část [4].²

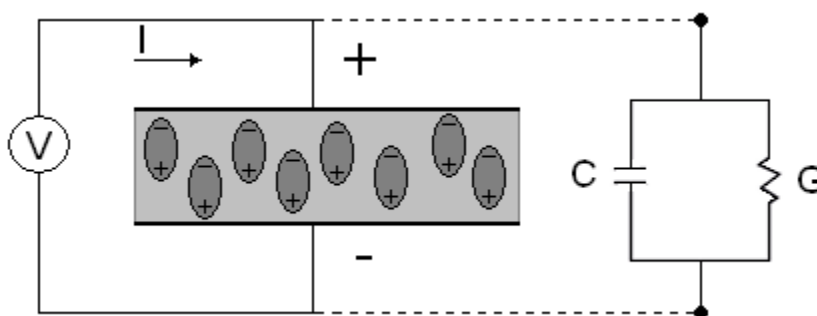
$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} \quad (3.10)$$

$$\varepsilon''(\omega) = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \frac{\omega \cdot \tau}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} \quad (3.11)$$

² Pro vypracování podkapitoly jsem využil literaturu [4] a pro ověření rovnic jsem využil [8]

3.2 Měření komplexní permitivity pomocí kapacitní metody

Tato metoda měření komplexní permitivity je využívána analyzátozem Agilent E4991A. Podstatou metody je rovinný kondenzátor, který vytváříme umístěním měřeného vzorku mezi elektrody zařízení 16452A, který je určen pro měření dielektrických vlastností materiálů. Při výpočtu naměřených hodnot využívá náhradního obvodu kondenzátoru. Náhradní obvod vychází z předpokladu, že reálný kondenzátor mohu nahradit ideálním kondenzátorem a odporem. Analyzátor pro výpočet používá paralelní zapojení těchto prvků, ale z obecného hlediska je lze zapojit i do série. Odpor v paralelním tvaru zastupuje reálné části impedance, které se projevují u reálného kondenzátoru. Mezi tyto vlastnosti patří ztráty, které vznikají v důsledku polarizačního efektu, svodový odpor dielektrika nebo odpor přívodů a další. Na obrázku 3.2 je znázorněno paralelní zapojení náhradního obvodu kondenzátoru.



Obr. 3.2: Náhradní schéma kondenzátoru

Hlavní nevýhodou kapacitní metody je skutečnost, že je použitelná pouze pro frekvence od 100 MHz do 1 GHz. Pokud bych nedodržel hodnotu maximální frekvence 1 GHz a měřil vyšší frekvence, dojde k znehodnocení naměřených hodnot relativní permitivity, která se získává z měření kapacity a odporu. Ke znehodnocení dojde následkem působení parazitní indukčnosti, která se projevuje při vyšších frekvencích na reálném kondenzátoru. Hlavním důvodem proč nesmím překročit 1 GHz, je podle výrobce konstrukční řešení zařízení 16453A, které umožňuje kalibraci pouze do této frekvence.

Při této metodě musí být zajištěno, aby vzdálenost mezi elektrodami byla mnohem menší než plošný rozměr kondenzátoru. Tohoto faktu si je výrobce analyzátoru dobře vědom, a proto stanovuje tloušťku měřeného vzorku v rozmezí od 0,3 mm do 3 mm a minimální rozměr vzorku na průměr $d=15$ mm. Pokud dodržím dané rozměry vzorku, omezím tím rozptyl elektrického pole na krajích měřících elektrod a nedojde ke vzniku chyby vlivem okrajové kapacity. Pokud pro admitanci kondenzátoru použiji komplexní permitivitu, dostanu vztah

$$Y = j\omega C = j\omega |\varepsilon_r^*| C_0 \quad (3.12)$$

Při aplikaci paralelního tvaru náhradního obvodu kondenzátoru můžeme admitanci popsat komplexní rovnicí, která má následující tvar [6]

$$Y^* = G + j\omega C = j\omega \left(\frac{C_p}{C_0} - j \frac{G}{\omega C_0} \right) C_0 \quad (3.13)$$

G je paralelní vodivost představující ztráty v dielektriku, které se mění v teplo. Paralelní kapacita, která představuje ukládání energie v materiálu je zastoupena v této rovnici jako C_p . Pokud by jako dielektrikum byl vzduch tak kapacita takového kondenzátoru je zastoupena hodnotou C_0 . Pokud budeme vycházet z faktu, že dielektrikum je ztrátové, bude relativní komplexní permitivita měřeného vzorku popsána rovnicí (3.14).³

$$\varepsilon_r^* = \frac{C_p}{C_0} - j \frac{G}{\omega C_0} \quad (3.14)$$

Reálnou a imaginární část relativní komplexní permitivity může z rovnice (3.14) vyjádřit jako

³ Pro vypracování této kapitoly jsem využil literaturu [6]

$$\varepsilon_r' = \frac{C_p}{C_0} = \frac{dC_p}{\varepsilon_0 S} \quad (3.15)$$

$$\varepsilon_r'' = \frac{G}{\omega C_0} = \frac{d}{\omega \varepsilon_0 S R_p} \quad (3.16)$$

kde S vyjadřuje plochu elektrod, d je tloušťka dielektrika, $\omega = 2\pi f$, $G \rightarrow \frac{1}{R_p}$. [3]

Můžeme vyjádřit kapacitu a vodivost a dostaneme vztahy:

$$C_p = \varepsilon_0 \varepsilon_r' \frac{S}{d} \quad (3.17)$$

$$G = \frac{1}{R_p} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'' \frac{S}{d} \quad (3.18)$$

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad (3.19)$$

Pokud dosadím do rovnice (3.13) dostaneme

$$\begin{aligned} Y^* = G + j\omega C_p &= j\omega \left(\frac{C_p}{C_0} - j \frac{G}{\omega C_0} \right) C_0 = j\omega \left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r' \frac{S}{d}}{\varepsilon_0 \frac{S}{d}} - j \frac{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'' \frac{S}{d}}{\omega \varepsilon_0 \frac{S}{d}} \right) \varepsilon_0 \frac{S}{d} = \\ &= j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r' \frac{S}{d} + \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'' \frac{S}{d} = \omega \varepsilon_0 \frac{S}{d} (\varepsilon_r'' + j\varepsilon_r') = j\omega \varepsilon_0 \frac{S}{d} (\varepsilon_r' - j\varepsilon_r'') \end{aligned} \quad (3.20)$$

Vztah (3.21) popisuje ztrátový výkon deskového kondenzátoru [5]

$$P_z = \frac{U}{R_p} = UI_r = UI_c \operatorname{tg} \delta = U^2 \omega C_p \operatorname{tg} \delta$$

(3.21)

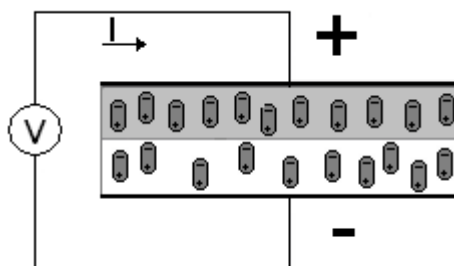
Měrný ztrátový výkon bychom určili jako podíl ztrátového výkonu a objemu dielektrika, který se nachází mezi elektrodami

$$p_z = \frac{P_z}{V} = \frac{U^2 \omega C_p \operatorname{tg} \delta}{V} = \left[\frac{\omega \varepsilon_r \varepsilon_0 S}{l} \cdot (El)^2 \operatorname{tg} \delta \right] / (S \cdot l) = \omega \varepsilon_r \varepsilon_0 E^2 \operatorname{tg} \delta$$

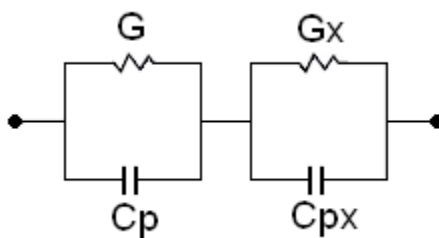
(3.22)

Složené dielektrikum [5]

Při měření vrstvených materiálů budu vycházet z předpokladu, že náhradní schéma vícevrstvého materiálu mohu uvažovat jako sériové zapojení kondenzátorů. Pro jednoduchost vezmu například dvouvrstvý model. Každá vrstva musí být z jiného materiálu, jinak bych vrstvy ze stejného materiálu, mohl spojit do jedné vrstvy. V případě této práce se může jednat o vrstvu materiálu FR-4 a nepájivé masky nebo FR-4 a měď. Na obrázku Obr. 3.4 je znázorněn náhradní obvod kondenzátoru s dvouvrstvým dielektrikem.



Obr. 3.3: Kondenzátor s dvouvrstvým dielektrikem



Obr. 3.4: Náhradní schéma kondenzátoru s dvouvrstvým dielektrikem

Výpočet celkové admitance kondenzátoru je vyjádřen rovnicí (3.25).

$$Ya^* = G_p + j\omega C_p = j\omega \left(\frac{C_p}{C_0} - j \frac{G}{\omega C_0} \right) C_0 \quad (3.23)$$

$$Yb^* = G_{px} + j\omega C_{px} = j\omega \left(\frac{C_{px}}{C_0} - j \frac{G_x}{\omega C_0} \right) C_0 \quad (3.24)$$

$$\frac{1}{Y_{celk}^*} = \frac{1}{Ya^*} + \frac{1}{Yb^*} \quad (3.25)$$

Po dosazení můžeme celkovou admitanci rozdělit na reálnou a imaginární část.[5]

$$Y_{celk}^* \{Re\} = \left[\frac{\frac{C_p C_{px} \omega + G_p G_{px}}{\omega^2 C_0} \cdot \frac{C_{px} + C_p}{C_0} + \frac{G_{px} C_p + G_p C_{px}}{\omega C_0^2} \cdot \frac{G_{px} + G_p}{\omega C_0}}{\left(\frac{C_{px} + C_p}{C_0} \right)^2 + \left(\frac{G_{px} + G_p}{\omega C_0} \right)^2} \right] \cdot j\omega C_0 \quad (3.26)$$

$$Y_{celk} \{Im\} = \left[\frac{\frac{C_p C_{px} \omega^2 + G_p G_{px}}{\omega^2 C_0^2} \cdot \frac{C_{px} + C_p}{\omega C_0} + \frac{G_{px} C_p + G_p C_{px}}{\omega C_0^2} \cdot \frac{C_{px} + C_p}{C_0}}{\left(\frac{C_{px} + C_p}{C_0}\right)^2 + \left(\frac{G_{px} + G_p}{\omega C_0}\right)^2} \right] \cdot j\omega C_0 \quad (3.27)$$

Pokud do celkové admitance viz. rovnice (3.25) dosadím za kapacitu a vodivosti z rovnic podle rovnice (3.20) dostanu

$$\frac{1}{j\omega \varepsilon_0 \frac{S}{d_1 + d_2} (\varepsilon'_{rc} - j\varepsilon''_{rc})} = \frac{1}{j\omega \varepsilon_0 \frac{S}{d_1} (\varepsilon'_{r1} - j\varepsilon''_{r1})} + \frac{1}{j\omega \varepsilon_0 \frac{S}{d_2} (\varepsilon'_{r2} - j\varepsilon''_{r2})} \quad (3.28)$$

Celková komplexní permitivita dvouvrstvého dielektrika bude⁴

$$\varepsilon'_{rc} - j\varepsilon''_{rc} = \frac{(d_1 + d_2)}{\frac{d_1}{\varepsilon'_{r1} - j\varepsilon''_{r1}} + \frac{d_2}{\varepsilon'_{r2} - j\varepsilon''_{r2}}} \quad (3.29)$$

⁴ Pro zpracování kapitoly jsem využil literaturu [6] [7]

4 Analyzátor pro měření komplexní permitivity

Materiálový analyzátor Agilent E4991A lze použít pro měření impedančních, dielektrických a magnetických vlastností zkoumaných materiálů. Analyzátor je použitelný pro rozsah frekvencí od 1 MHz do 3 GHz s maximálním rozlišením 1 mHz. Z tohoto důvodu se velmi často používá i jako frekvenční generátor. Maximální počet měřených bodů je ale omezen na 801. Za pomoci analyzátoru a příslušných měřicích zařízení mohou naměřit tyto veličiny:

Dielektrické vlastnosti materiálů $|\epsilon_r|$, ϵ_r' , ϵ_r'' , $\tan \delta$

Magnetické vlastnosti materiálů $|\mu_r|$, μ_r' , μ_r'' , $\tan \delta$

Výhodou analyzátoru je grafické rozhraní, které umožňuje snadné ovládání pomocí myši a klávesnice. Analyzátor nám umožňuje měřit najednou až 3 veličiny. Pokud by nebyla k dispozici myš a klávesnice, je možné využít ovládací prvky, které se nacházejí v pravé části analyzátoru na přední straně, ale z vlastní zkušenosti tuto variantu nedoporučuji. Ovládání tímto způsobem vyžaduje více času. Celý program běží na operačním systému Microsoft Windows 2000. Nespornou výhodou analyzátoru je, že se výsledky měření zobrazují ve formě grafů na 8,4" TFT LCD displeji, který se nachází v levé čelní části analyzátoru. Všechna naměřená data máme možnost uložit ve formátu ASCII a následně je pak používat pro další práci v jiných programech jako je Excel nebo Matlab. Kromě samotných dat nebo hodnot kalibrace je tu možnost uložit aktuální obrazovku analyzátoru jako obrázek ve formátu jpg. Samotný analyzátor se může využívat i jako frekvenční generátor od 1 MHz do 3 GHz. Analyzátor je zobrazen na Obr. 4.1.



Obr. 4.1: Fotografie analyzátoru E4991A RF Impedance/Material

Zařízení 16453A

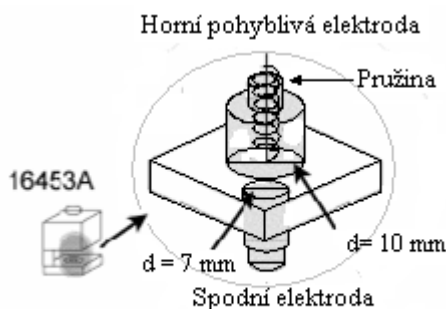
Přídavné zařízení 16453A slouží pro upínání vzorků dielektrických materiálů při použití analyzátoru pro měření dielektrických vlastností (absolutní relativní permitivity $|\epsilon_r|$, reálné ϵ_r' a imaginární ϵ_r'' složky komplexní relativní permitivity, jejich poměru tangenty ztrátového úhlu $\tan \delta$). Zařízení se upevňuje na testovací hlavici, která se následně připojí k analyzátoru. Rozsah napětí, kterým mohou měřit je ± 40 V saturační (AC+DC). Teplota se může pohybovat od -55 °C do $+200$ °C. Rozměr měřeného vzorku musí být $0,3 \leq t \leq 3$ mm a $d \geq 15$ mm.



Obr. 4.2: Zařízení 16453A pro měření dielektrických vlastností materiálu

Měřený vzorek, který splňuje výše uvedené parametry, se vkládá mezi horní pohyblivou elektrodu a dolní měřicí elektrodu (1), která je pevná. Pro správné umístění vzorku mezi elektrody se nastavuje přítlak horní elektrody tak, aby mezi vzorkem a elektrodami nevznikla vzduchová mezera, ale zároveň nesmí dojít k deformaci vzorku, protože v těchto případech by došlo k znehodnocení naměřených hodnot. Výsuvný knoflík (3) v horní části zařízení 16453A slouží ke zvednutí horní elektrody. Západka (2), která se nachází na pravé boční straně, slouží k aretaci tohoto knoflíku v jeho maximální horní poloze, která se pak využívá při kalibraci naprázdno. Jak už jsem se zmínil, pro

měření komplexní permitivity využívám kapacitní metodu. Kondenzátor vytvořím vždy vložení vzorku mezi elektrody. To znázorňuje Obr. 4.3. Za plochu S je brána plocha dolní elektrody.



Obr. 4.3: Elektrody zařízení 16453A

Chyby měření na zařízení 16453A

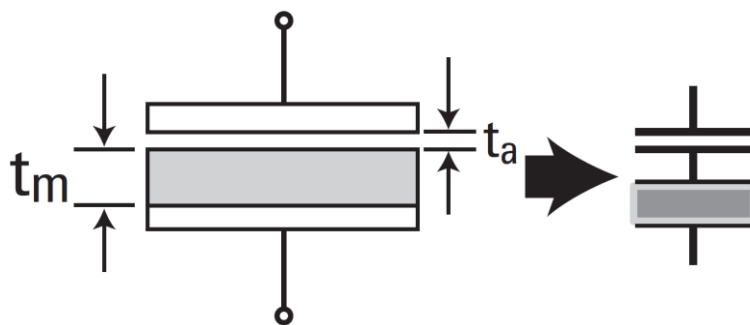
Stále nepředvídatelné chyby zařízení 16453A

Jedná se o chyby, které jsou způsobené malými změnami frekvence a fázovým posunem harmonického buzení, zbytkovou impedancí a parazitní admitancí zařízení 16453A. Před samotným měřením se proto musí provést kalibrace, která tyto chyby eliminuje. Při kalibraci se využívá kalibračního etalonu z PTFE, který je dodáván spolu se zařízením 16453A. Důvodem proč je jako kalibrační etalon použit PTFE, je kvůli jeho stálosti v celém měřeném rozsahu frekvencí a jeho malým ztrátám.

Chyba vlivem vzduchové mezery

Pokud bychom měřený vzorek špatně upevnili, vznikne mezi ním a elektrodou upínače zařízení 16453A vzduchová mezera. Tak dojde k tomu, že změřím jak kapacitu vzorku, tak i kapacitu vzniklé vzduchové mezery. V důsledku toho pak dojde ke snížení kapacity a tedy tím i relativní permitivity. Z této nepříjemné skutečnosti plyne důležitá podmínka

správného upnutí vzorku. Správného upnutí vzorku dosáhneme nastavením takového přítlaku elektrod, aby nevznikla vzduchová mezera, ale zároveň nesmí dojít k deformaci tloušťky měřeného vzorku v důsledku příliš velkého tlaku, díky kterým by došlo ke změně reálné části komplexní permitivity. Pokud by se ale vzduchová mezera vytvořila, jak je znázorněno na Obr. 4.4 můžeme tuto chybu dopočítat.



Obr. 4.4: Chyba vzduchové mezery [7]

Vzhledem k tomu že se jedná o vzduch tak neuvažujeme ztrátový faktor. Vzniklá vzduchová mezera má především vliv na reálnou složku komplexní permitivity. Vzduchovou mezeru a měřený vzorek můžeme vyjádřit jako zapojení dvou kondenzátorů v sérii jak je vidět na Obr. 4.4. Vliv tloušťky vzduchové mezery je znázorněn v Obr. 4.5, kde je daná chyba mezery realizovaná jako funkce reálné části komplexní permitivity a podílu tloušťky měřeného vzorku a vzduchové mezery [7]. Jak je vidět vliv vzduchové mezery výrazně narůstá pro tenké materiály s vysokou relativní permitivitou.

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{A}{t_a} \quad (4.1)$$

$$C_x = \varepsilon_0 \varepsilon_x \frac{A}{t_m} \quad (4.2)$$

$$C_{er} = \frac{1}{\frac{1}{C_0} + \frac{1}{C_x}} = \varepsilon_{er} \varepsilon_0 \frac{A}{t_m + t_a} \quad (4.3)$$

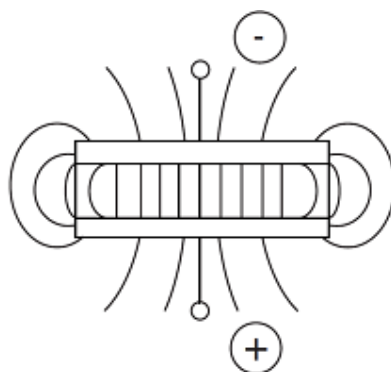
$$1 - \frac{\varepsilon_{er}}{\varepsilon_x} = \frac{\varepsilon_x - 1}{\varepsilon_x + \frac{t_m}{t_a}} \quad (4.4)$$

$\frac{t_a}{t_m} \backslash \varepsilon_r'$	2	5	10	20	50	100
0.001	0.1%	0.4%	1%	2%	5%	9%
0.005	0.5%	2%	4%	9%	20%	33%
0.01	1%	4%	8%	16%	33%	50%
0.05	5%	16%	30%	48%	70%	83%
0.1	8%	27%	45%	63%	82%	90%

Obr. 4.5: Vliv chyby vzduchové mezery na hodnoty měření [7]

Chyba vlivem okrajové kapacity

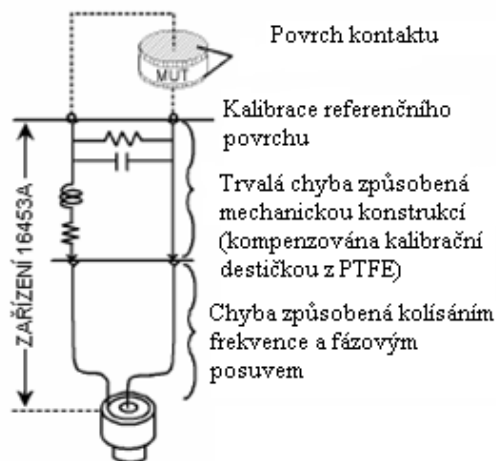
Při měření kapacity dielektrika se kolem elektrod zařízení 16453A vytváří elektrické pole, které je znázorněno na Obr. 4.6. Po jeho prohlédnutí by nám mělo být jasné, že při měření je započítána i kapacita vně elektrod. Pokud při měření využíváme zařízení 16453A tak s touto chybou počítáme. Také nám tento jev poskytl odpověď, proč musí být minimální plošný rozměr vzorku větší než plocha elektrod upínače. Pokud by nebyl dodržen minimální dovolený rozměr, tak bychom naměřili větší kapacitu, než která je ve skutečnosti.



Obr. 4.6: Okrajová kapacita

Kalibrace zařízení 16453A

Důležitým krokem pro odstranění stálých nepředvídatelných chyb, které vznikají vlivem připojení zařízení 16453A a chyb, které jsou způsobeny frekvencí elektrického buzení je již dříve zmíněná kalibrace. Kalibrace vychází z použití MUT propojovací roviny zařízení 16453A realizovanou jako kalibrace základní roviny zobrazenou na Obr. 4.7.



Obr. 4.7: Model chyby zařízení 16453A

Samotná kalibrace je rozdělena na tři základní části. Jako první se musí provést kalibrace nakrátko, kdy se elektrody dotýkají. Tento stav je dovolen pouze při této kalibraci a nesmí nastat při měření, jinak může dojít ke zkratu a zařízení se musí znovu kalibrovat. Po provedení následuje kalibrace naprázdno, při které se horní pohyblivá elektroda vysune do maximální horní polohy a zaaretuje se v ní. Mezi elektrodami tak bude jako dielektrikum vzduch. Poslední částí kalibrace je kalibrace se zátěží, kde mezi elektrody umístíme kalibrační destičku, která je z PTFE o tloušťce $t=0,8$ mm. Destička je standardně dodávána se zařízením 16453A. Před spuštěním kalibrace se musíme přesvědčit, jestli je v materiálových vlastnostech kalibrační sady nastavena reálná část relativní permitivity na hodnotě 2,1 a imaginární část je nastavena na nulu. Pokud by tak nebylo, musíme doplnit tyto hodnoty, protože se jedná o parametry kalibrační destičky a při jejich nesplnění by se přístroj nastavil špatně. Důvodem použití materiálu PTFE je ten, že jeho vlastnosti jsou konstantní pro celý rozsah měřených frekvencí. Při kalibraci se změní hodnoty permitivity a výpočty se upraví podle kalibrační tabulky na upravené hodnoty permitivity pro jednotlivé frekvence. Nevýhodou kalibrace je, že nedokáže kompenzovat chyby, které vznikají rozptylem elektrického pole kolem měřících elektrod. Z toho důvodu by chyba měření narůstala s tloušťkou zkoumaného vzorku, a proto je důležité, aby byla dodržena maximální dovolená tloušťka vzorku $t=3$ mm.⁵

⁵ Pro podrobnější seznámení s analyzátozem doporučuji prostudovat literaturu [6]

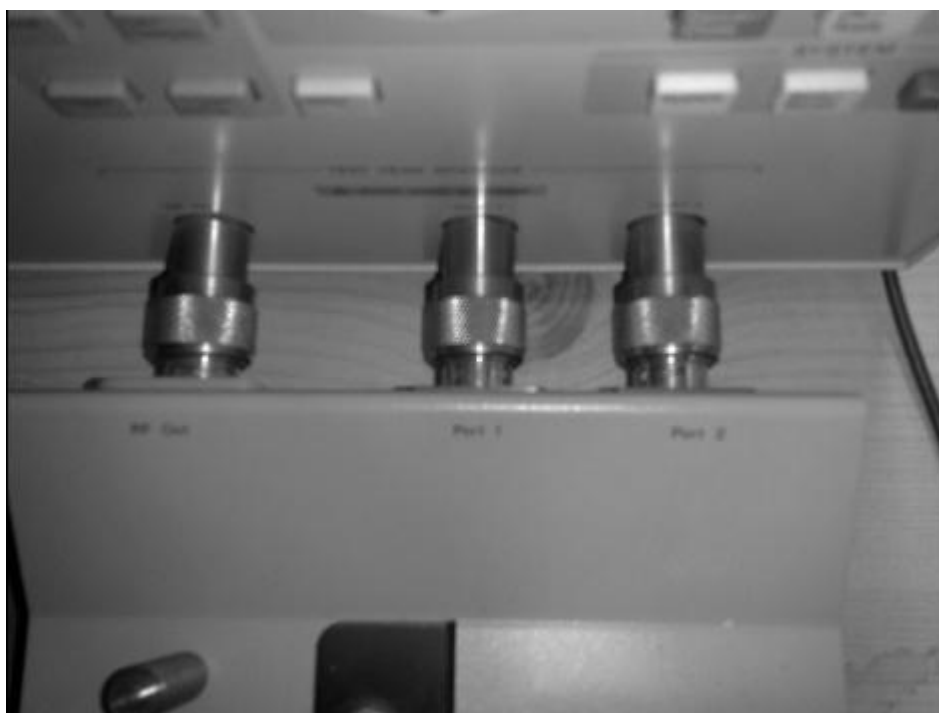
5 Vlastní měření

5.1 Měření jednovrstvých etalonů

Jednotlivé vzorky materiálů jsem nechal vyrobiť podle kritérií, určených výrobcem. Před samotným měřením se vzorky musí připravit k měření z toho důvodu, že na permitivitu materiálu má vliv okolní prostředí tzn. teplota a vlhkost. Na začátku jsem vzorky očistil od všech nečistot a mastnoty 60% technickým lihem určeným k tomuto účelu. Po vyčištění jsem se zkoumanými vzorky zacházel v rukavicích z důvodu zachování čistoty vzorků. Pokud bych tak neučinil, mohlo by dojít k umaštění vzorku. Následné nečistoty by mohly ovlivnit výsledky měření. Poté co vzorky oschly, jsem nechal vzorky vysušit z toho důvodu, abych se zbavil přebytečné vlhkosti, která se do vzorků mohla dostat během převozu. Po odstranění nadbytečné vlhkosti, což trvalo asi 48 hodin, jsem je ponechal v uzavření nádobě. Vzhledem k tomu, že v běžném provozu se výrobky nenacházejí v místech s nulovou vlhkostí, jsem odvlhčené vzorky nechal ustálit v podmínkách, při kterých byla 50% vlhkost vzduchu při teplotě 23 °C. Vzorky jsem tak ponechal po dobu dalších 48 hodin. Poté jsem vzorky uzavřel v nepropustném ochranném obalu, abych zamezil vlivu působení vlhkosti. Takto připravené vzorky k měření jsem změřil v místnosti s teplotou, která se pohybovala okolo 25 °C. Úprava těchto vzorků vydržela po celou dobu měření vzhledem k tomu, že navlhavost z okolního vzduchu je poměrně pomalá. Celý tento proces přípravy vzorků jsem dělal z důvodu, zamezení ovlivnění měřené permitivity vlivem teploty a vlhkosti na materiál. Je jasné, že tato úprava musí proběhnout vždy před samotným měřením a to si vyžaduje minimálně 96 hodin.

Po těchto úpravách jsem mohl začít samotné měření. K měření jsem využil Agilent E4991A RF Impedance/Material Analyzer s připojeným měřicím zařízením 16453A, který je určen k měření komplexní permitivity dielektrik pomocí kapacitní metody. Analyzátor a měřicí zařízení je podrobně popsáno v kapitole 4. Princip kapacitní metody je popsán v kapitole 3.2. Výhodou použití analyzátoru je, že naměřené hodnoty nejsou paralelní odpor a paralelní kapacita, ale přímo dopočítaná komplexní permitivita. Při zapnutí analyzátoru je nutné dát jeho nastavení do výchozího stavu. Vzhledem k tomu, že budeme měřit permitivitu, musíme tak nastavit v menu vlastností materiálu. (Utility

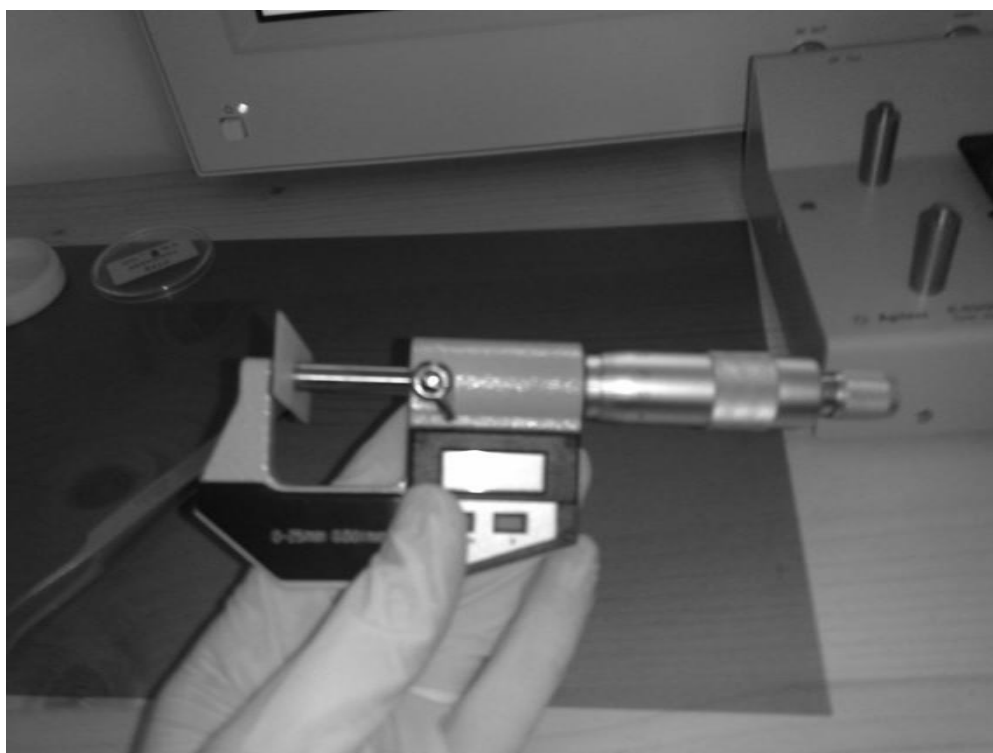
menu→Utility→Material option Menu→Material Type). Následuje pak nastavení měřených veličin a zvolení měřítka osy y . Jako osu x nastavíme frekvenci a počet bodů, které budeme měřit. Jako zdroj bude sloužit napětí, které bude oscilovat v námi nastavené hodnotě. Já jsem si zvolil hodnotu napětí 500 mV. Důležitým krokem při měření je nastavení počáteční a konečné hodnoty frekvence. Její minimální a maximální hodnota je popsána v kapitole 3.2. Poté následuje kalibrace za předpokladu, že k analyzátoru je připojené měřicí zařízení 16453A přes měřicí hlavici. V opačném případě ho připojíme pomocí tří 7 mm konektorů. První slouží jako vstupně výstupní port a zbylé dvě jsou označeny názvem Port1 a Port2. První konektor je pohyblivý z důvodu snadnější instalace, která se ukázala i přes tuto vlastnost náročná. Propojení analyzátoru a testovací hlavičky je zobrazeno na Obr. 5.1.



Obr. 5.1: Propojení analyzátoru E4991A a testovací hlavičky

Podrobnější popis kalibrace je v kapitole 4. Před samotnou kalibrací si zvolím způsob kalibrace. Na výběr mám ze tří možností: UserFreq&Pwr, která kalibruje jak rozsah frekvencí, tak i hodnotu napětí, Fixed Freq&Pwr, která kalibruje vzhledem k napětí (100mV) a frekvenci, která je předem definované výrobcem a námi nastavené frekvence

pomocí interpolace dopočítává, nebo mohu nastavit FixedFreqUserPwr, který kalibruje na frekvencích daných výrobcem a námi nastaveném napětí. Jako volbu jsem zvolil první variantu a to z důvodu přesnějšího měření, které trvá déle. Nevýhodou tohoto způsobu kalibrace je skutečnost, že nemohu měnit rozsah frekvencí při měření, protože by tato kalibrace neplatila. Druhé dva způsoby změnu frekvence umožňují vzhledem k tomu, že kalibraci na frekvenci dopočítávají. Po kalibraci mohu měřit. Při měření se mi osvědčila možnost, automatického nastavení rozsahu os y. Při každém měření musím nastavit správnou tloušťku vloženého vzorku a to z toho důvodu, aby přístroj mohl spočítat komplexní permitivitu. K měření tloušťky vzorku jsem použil mikrometr, který měří s přesností $\pm 0,001$ mm. Měření tloušťky vzorku je znázorněno na Obr. 5.2.



Obr. 5.2: Měření tloušťky vzorku

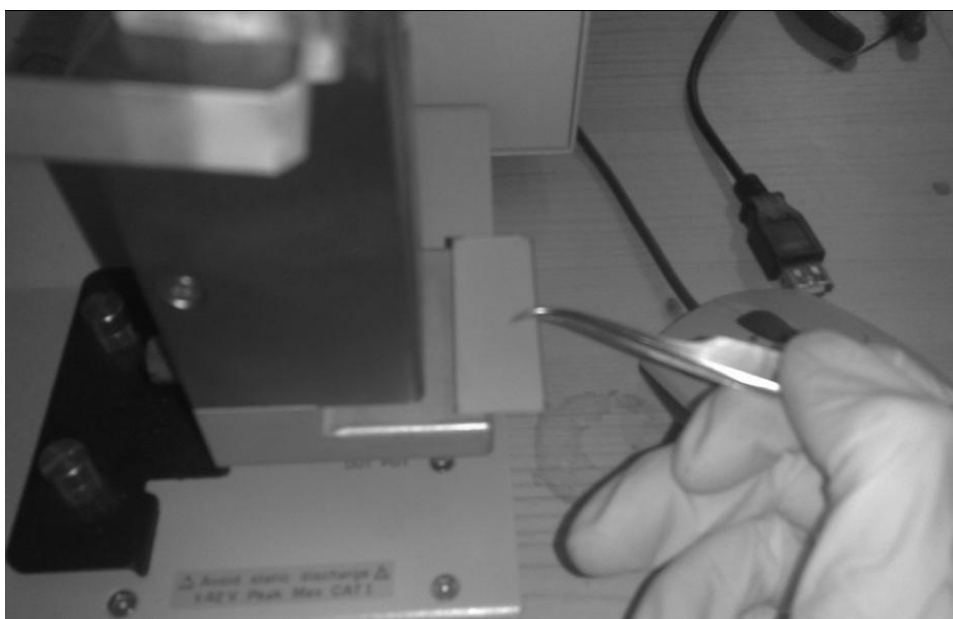
Při kalibraci je dobré zvolit takový přitlak elektrod, aby nevznikla vzduchová mezera. Vzhledem k tomu, že materiál kalibrační destičky je pevný, nemusím se obávat, že by došlo k jeho deformaci. Při vkládání měřeného vzorku jsem pro lepší stanovení přitlaku elektrod použil zařízení, které se nainstaluje nahoru na výsuvný kužel, který slouží

k nadzvednutí elektrody. Díky jeho jemnému mechanickému řešení mám možnost posouvat s elektrodou s přesností 1 μm . Užitím tohoto zařízení mi odpadl problém s nastavením vhodného přítlaku elektrody. Problém totiž nastává při deformaci vzorku s následkem změny permitivity. Vzhledem k tomu, že tento nástavec není součástí soupravy, kterou poskytuje výrobce spolu se zařízením, jsem ověřil správnost tohoto měření na kalibrační destičce u které znám její reálnou a imaginární složku. Zařízení pro měření vzdálenosti elektrod je vidět na Obr. 5.3.



Obr. 5.3: Zařízení pro odměřování vzdálenosti elektrod

Vkládání vzorků mezi elektrody je v důsledku špatné dostupnosti lepší za pomoci pinzety, která se mi při práci osvědčila. Vkládání vzorku je vidět na Obr. 5.4. Na něm je vidět, že místo které slouží pro umístění vzorku je dost omezené, a proto je lepší pro správné umístění použít pinzetu.



Obr. 5.4: Vkládání vzorku mezi měřicí elektrody

Před každým spuštěním měření se musíme přesvědčit, že vzorek vložený mezi měřicí elektrody se nedotýká žádné části analyzátoru, kromě měřicích elektrod. Hlavní problém by mohl nastat s dotykem s levou stranou analyzátoru a vzorku, vzhledem k malé vzdálenosti měřicích elektrod. Za předpokladu, že by došlo ke kontaktu s touto částí, nebo jinou částí kromě elektrod, došlo by k znehodnocení kalibrace. Při vyšších napětích by mohlo dojít k poškození přístroje.

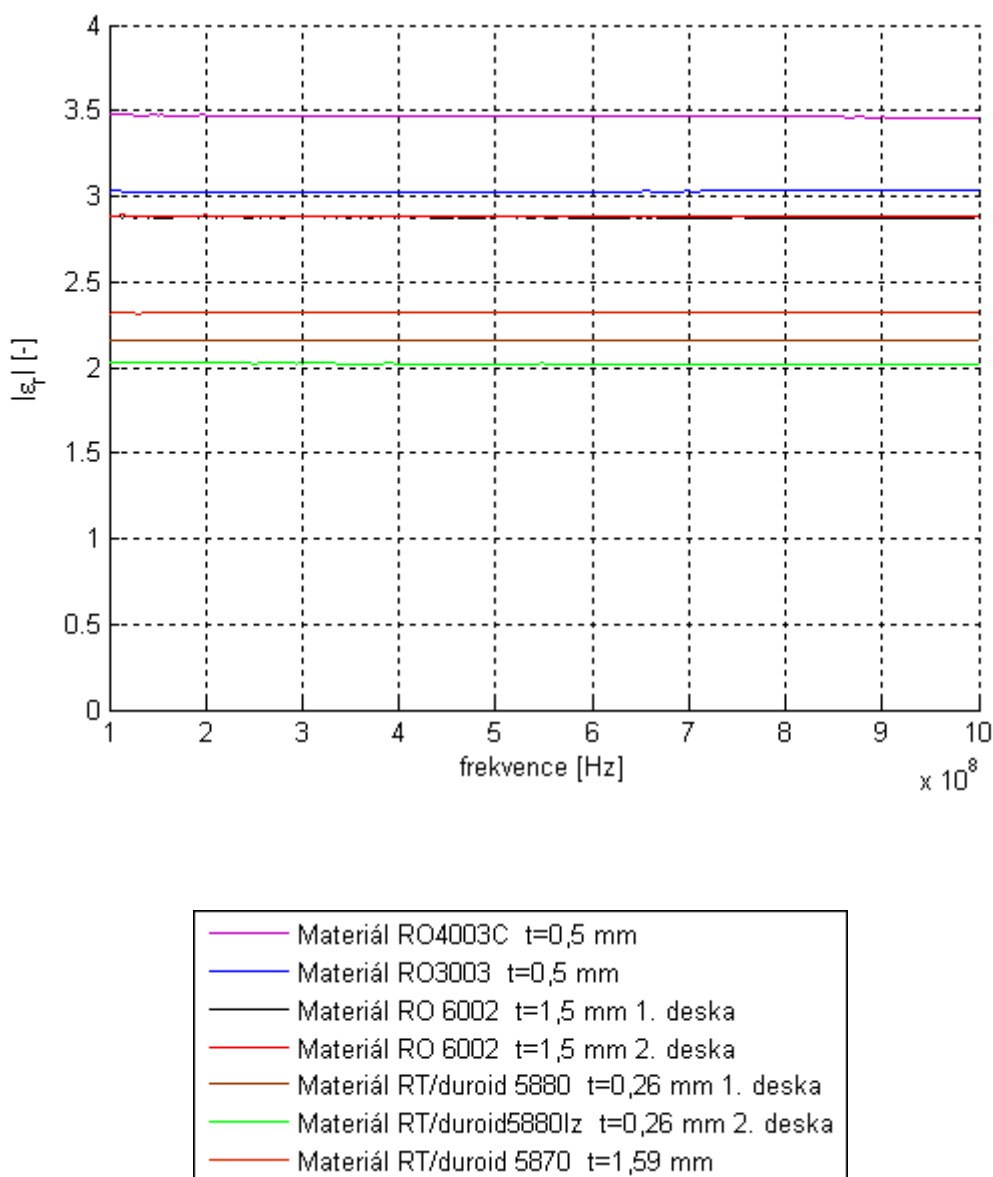
Měřené vzorky

K měření jsem si zvolil materiál, který je podle výrobce stálý do vysokých frekvencí až 10 GHz. Tabulka udává rozsah hodnot ϵ_r různých materiálů, podle informací od výrobce a naměřené hodnoty, které jsem získal při měření.

Tab. 5.1: Srovnání naměřených hodnot s údaji poskytnutých od výrobce

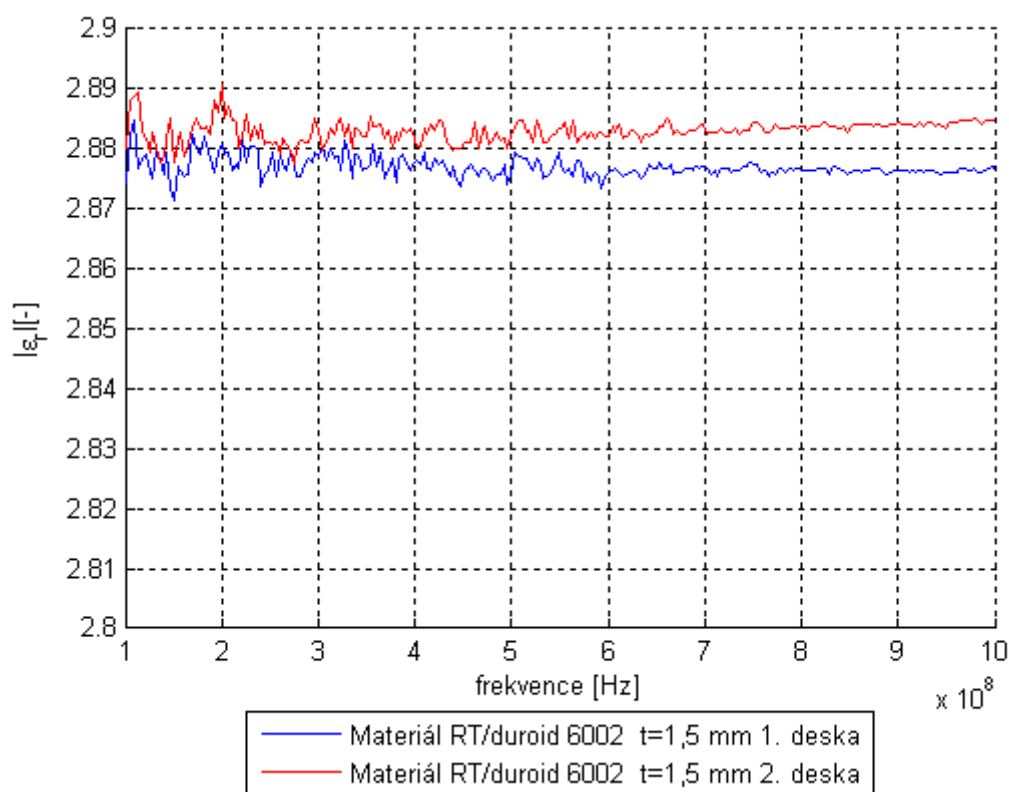
Označení materiálu	Typ materiálu	Tloušťka [mm]	ϵ_r při 10 GHz Výrobce [-]	Naměřená ϵ_r při 1 GHz [-]
RO_4003C	Uhlovodíková keramika	0,5	$3,48 \pm 0,05$	3,459
RO_3003	PTFE keramika	0,75	$3,00 \pm 0,04$	3,038
RT/duroid 6002	PTFE keramika	1,5	$2,94 \pm 0,04$	2,88
RT/duroid 5880	PTFE vyztužený skelnými vlákny	0,26	$2,20 \pm 0,02$	2,16
RT/duroid 5870	PTFE s příměsí skla	1,59	$2,33 \pm 0,02$	2,32

Z porovnání těchto hodnot zjistíme, že materiál, který obsahuje PTFE a je vyztužený vlákny ze skla vyšel podle měření trochu menší než je tolerance od výrobce. Tato hodnota se dala očekávat vzhledem k tomu, že tloušťka vzorku byla trochu menší, než je minimální dovolená tloušťka. Na Obr. 5.5 je znázorněn průběh absolutní relativní permitivity několika vzorků z různých materiálů o různé tloušťce a při rozsahu frekvence od 100 MHz do 1 GHz.



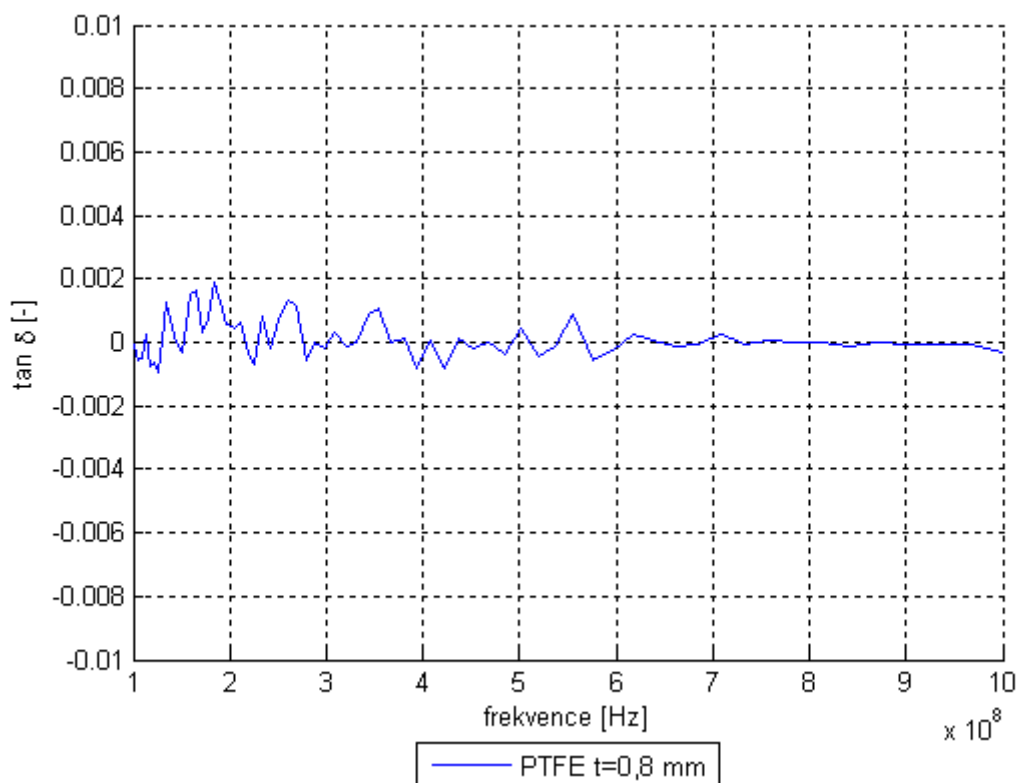
Obr. 5.5: Obrázek grafu závislosti absolutní relativní permitivity na frekvenci

Při měření se měřili i dva vzorky, které měly stejnou tloušťku, a materiálové složení. Jediná odlišnost byla v povrchové úpravě prvního vzorku, který měl jinou barvu povrchu. Na Obr. 5.6 je znázorněno podrobnější zobrazení, na kterém je vidět, že zkoumané vzorky mají stejné vlastnosti a povrchovou úpravou nedošlo k jejich ovlivnění



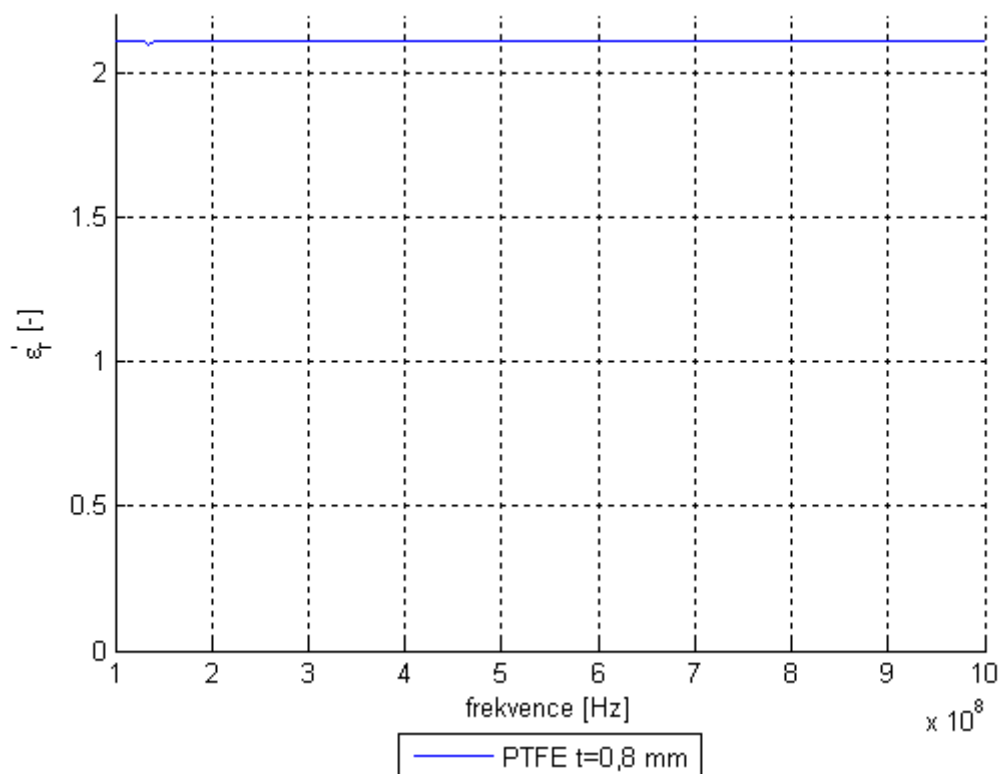
Obr. 5.6: Srovnání absolutní permitivity desky s úpravou a bez úpravy

Při měření jsem měřil i ztrátový činitel, který nesmí v daném rozsahu frekvencí příliš kmitat jinak je měření nepřesné. Při měření ztrátového činitele jsem zjistil, že se nehodí pro materiály s malým ztrátovým činitelem. To je případ těchto materiálů s příměsí PTFE. Jak je patrné z Obr. 5.7 ztrátový činitel není nulový.



Obr. 5.7: Ztrátový činitel kalibrační destičky z PTFE

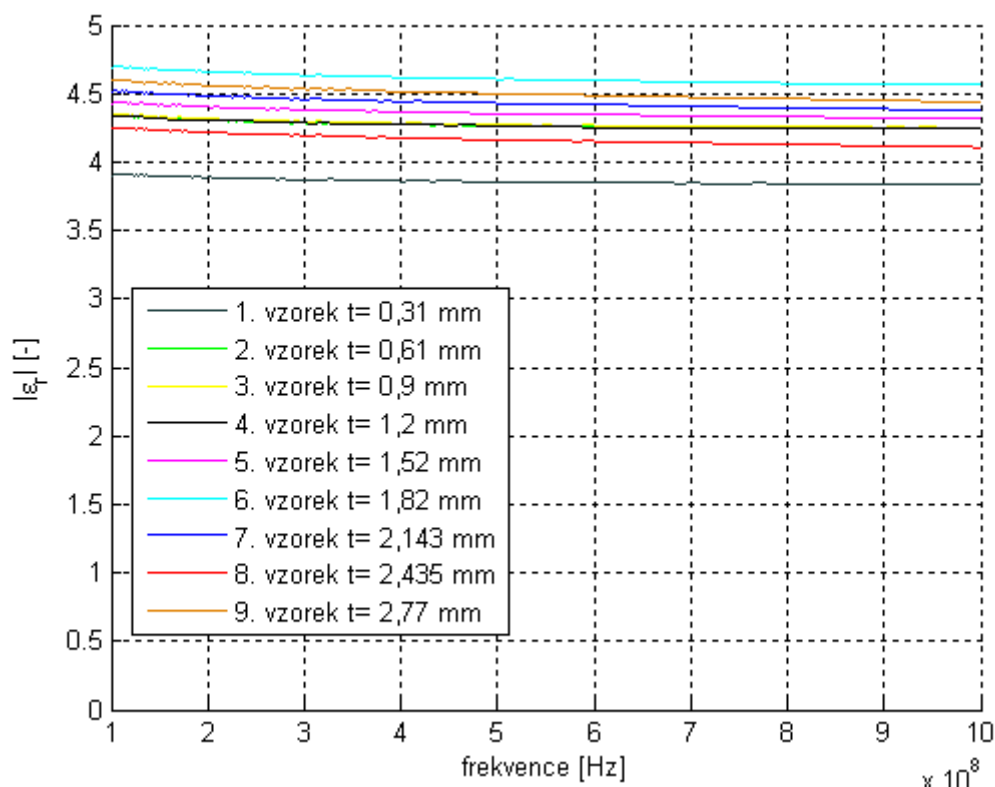
Tento fakt je ovlivněn velikostí imaginární složky, ale na hodnotu absolutní relativní permitivity nemá žádný vliv. Už dříve jsme se dozvěděli, že reálná část komplexní permitivity má být přesně 2,1 což je vidět i na Obr. 5.8. Správnost kalibrace jsme ověřili hodnotou ϵ' která je konstantní v celém rozsahu měřených frekvencí. Pokud by tato hodnota vyšla odlišná tak kalibrace není úplně správná. K tomu může dojít nesprávnou vzdáleností mezi měřicími elektrodami a tím vzniklou vzduchovou mezerou nebo deformací vzorku.



Obr. 5.8: Graf reálné části komplexní permitivity kalibrační destičky

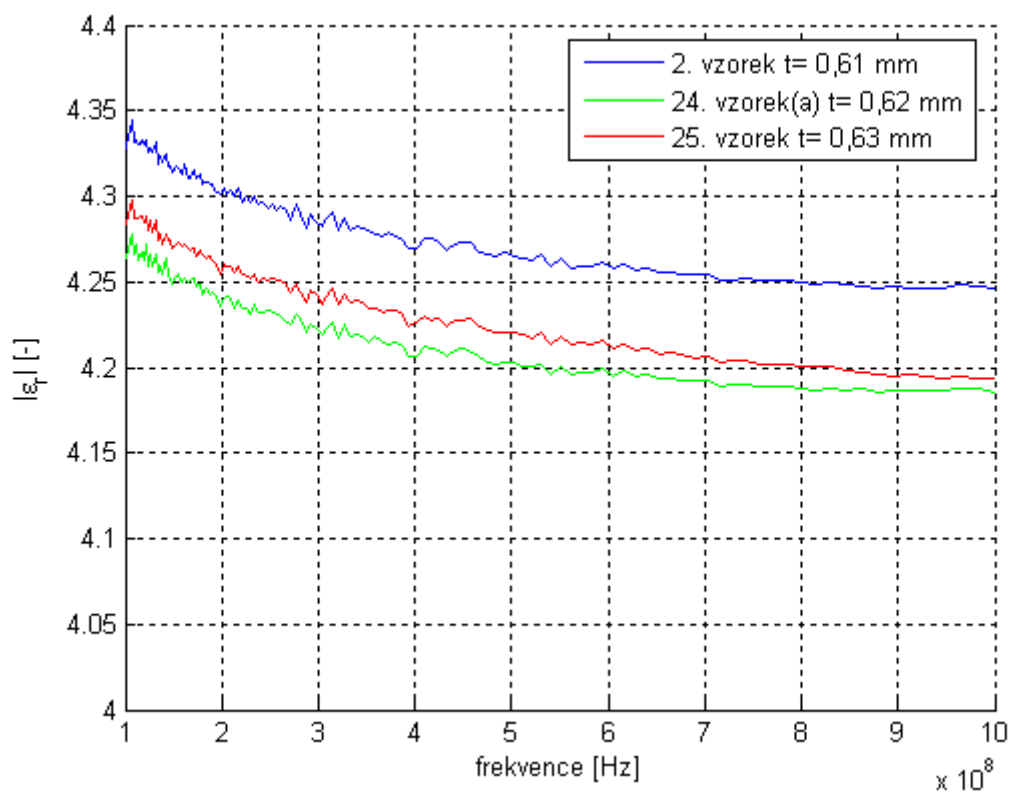
5.2 Experimentální metoda měření vrstvených dielektrik

Podmínkou pro tuto metodu je zvládnutí měření jednovrstvých dielektrik. Metoda je založena na měření komplexní permitivity vrstvených dielektrik. Cílem bude měřit celkovou absolutní permitivitu vrstvených dielektrik. Jako první jsem měřil vliv tloušťky vrstvených materiálů. Toho jsem dosáhl různým počtem vrstev základního materiálu z FR-4, který bývá obecně kolem 4,5, ale u každého výrobce je tato hodnota trochu jiná podle obsahu pryskyřice. Obrázek Obr. 5.9 ukazuje naměřené hodnoty ve frekvenčním pásmu od 100 MHz do 1 GHz. Číslo vzorku udává počet jednotlivých vrstev dielektrik. Tloušťka dielektrik se nedala jednoduše násobit počtem vrstev, ale musela se velmi přesně změřit z důvodu nestejně tloušťky jednotlivých dielektrik.

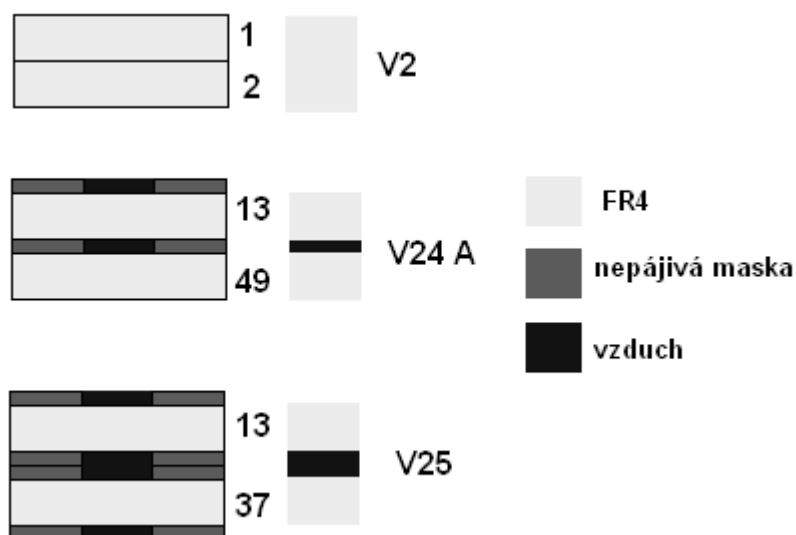


Obr. 5.9: Graf vlivu počtu vrstev dielektrika na absolutní relativní permitivitu

Z obrázku je jasné, že nejlepší vlastnosti jsou při dvou až čtyřech vrstvách. Pokud byla pouze jedna vrstva tak naměřená hodnota je menší. To pro nás není až tak nečekané, protože tloušťka je na spodní dovolené měřitelné hranici. Při pěti a šesti vrstvách došlo ke zvětšení z důvodu rozptylu pole mezi jednotlivými vrstvami, ale při vyšším počtu vrstev jsme se jí nevyhnuli z důvodu vytlačení vzduchu mezi vrstvami. U vzorku číslo 8 je vidět, že došlo k poklesu vzhledem vzniku vzduchových mezer. Díky tomuto pokusu jsme zjistili, že počet vrstev je výhodný do čtyř a pak dochází k ovlivnění měření. Jako další experiment jsme zkoumali vliv vzduchové mezery mezi jednotlivými vrstvami. Na Obr. 5.10 je znázorněno, jaký vliv má právě vzduchová mezera mezi dvěma vrstvami. Je jasné, že při vzniku vzduchové mezery o 0,01 mm dojde ke snížení $|\epsilon_r|$. Jestliže ale platí, že čím větší mezera tak tím menší hodnota tak proč je při mezeře 0,02 mm hodnota zvětšena? Vysvětlení se nám nabízí při pohledu na Obr. 5.11 kde je znázorněno rozmístění vrstev.

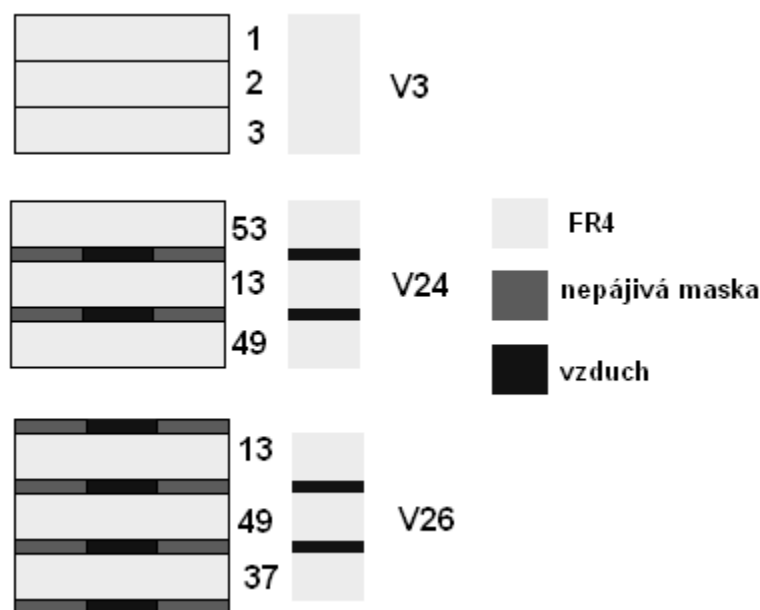


Obr. 5.10: Vliv tloušťky vrstvy vzduchu mezi vrstvami na měření



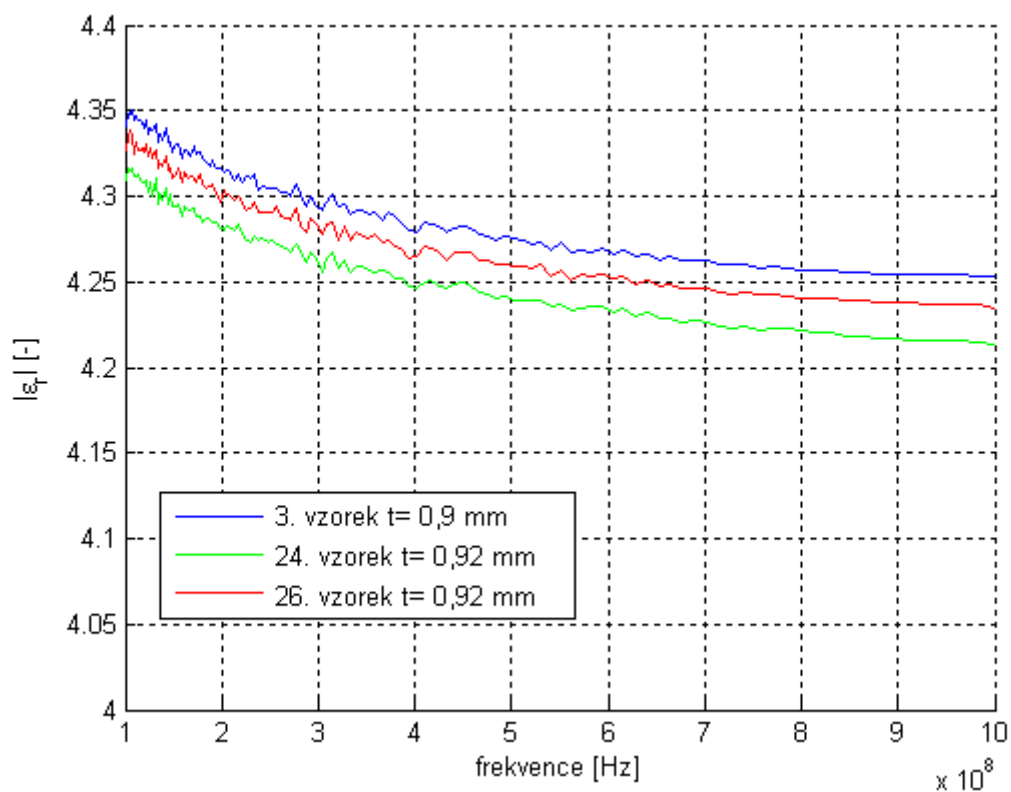
Obr. 5.11: Vliv vzduchové mezery mezi dielektriky

Z toho plyne důležitá informace o tom, že nepájivá maska kolem dolní měřicí elektrody zvětšuje $|\epsilon_r|$. K tomuto došlo i přesto, že nepájivá maska byla odleptána v takové míře, že by neměla ovlivnit dielektrikum mezi elektrodami. Způsobeno je to okrajovou kapacitou, která i přes kalibraci není 100% vzhledem ke změně okolního dielektrika, které je mimo oblast měření určenou výrobcem. Na Obr. 5.12 je stejný pokus se třemi vrstvami s nepatrnou úpravou.

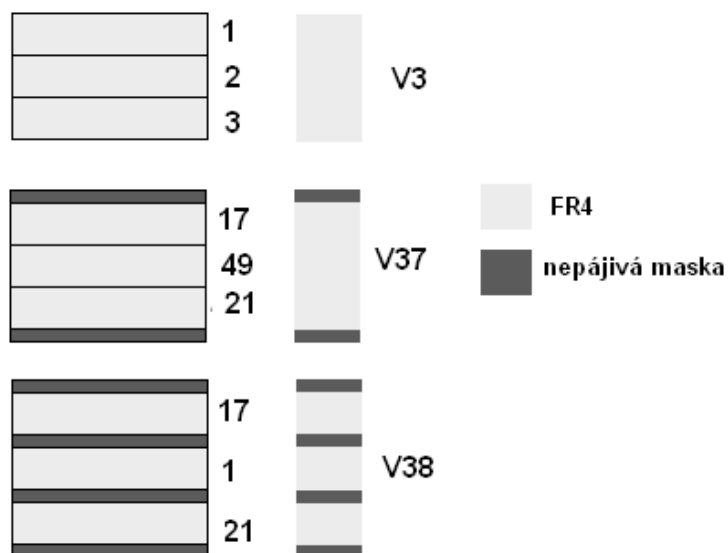


Obr. 5.12: Rozmístění vrstev dielektrika při zkoumání vlivu vzduchové mezery

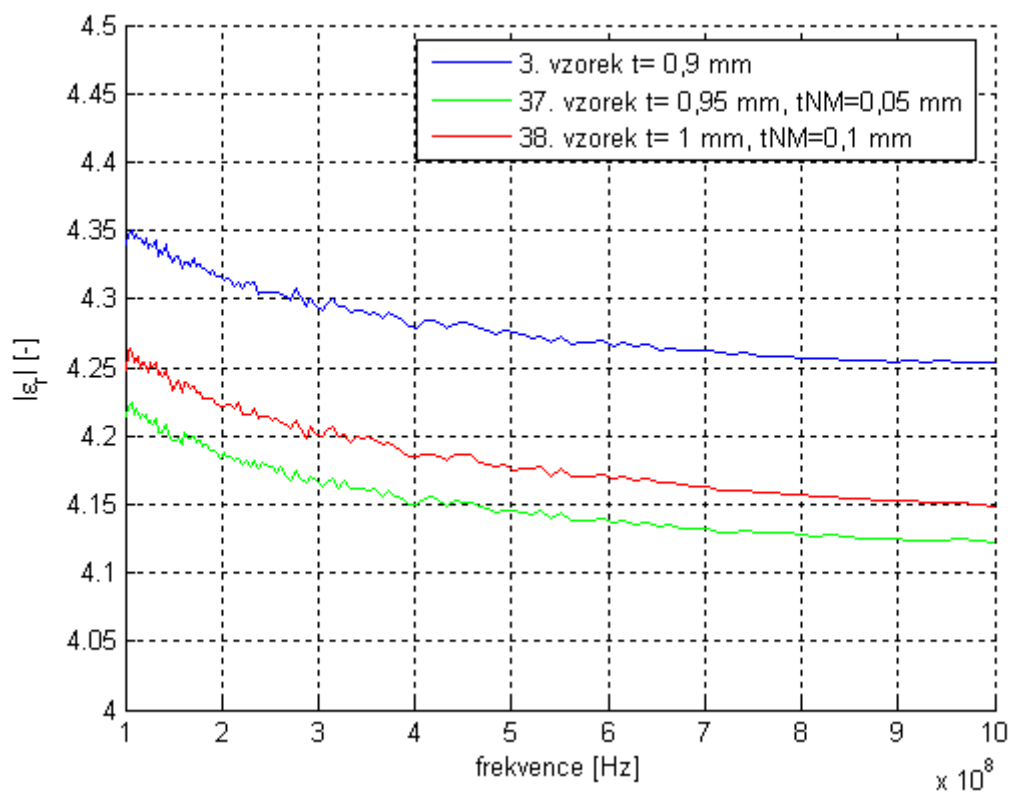
Pokud je předchozí předpoklad správný tak by mělo u varianty 26 dojít ke zvýšení $|\epsilon_r|$. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v Obr. 5.13. Dalším krokem bude zkoumání vlivu nepájivé masky v měřené oblasti dielektrika. Zde budeme zkoumat vliv tloušťky nepájivé masky na měření. Rozmístění vrstev je znázorněno na Obr. 5.14. Na dalším obrázku Obr. 5.15 jsou znázorněny výsledky z měření a je na nich vidět, že při větší vrstvě nepájivé masky se $|\epsilon_r|$ zvětší. Během měření chování vrstvených dielektrik mě napadlo, jak bude ovlivněno měření, pokud bude dielektrikum mezi měřícími elektrodami stejné, ale bude jinak poskládané. Z použité metody by mělo vyplynout, že by neměl mít vliv na měření. Pro lepší představu je rozmístění dielektrik zobrazeno na Obr. 5.16. Výsledky dopadly podle očekávání a jsou vidět na Obr. 5.17.



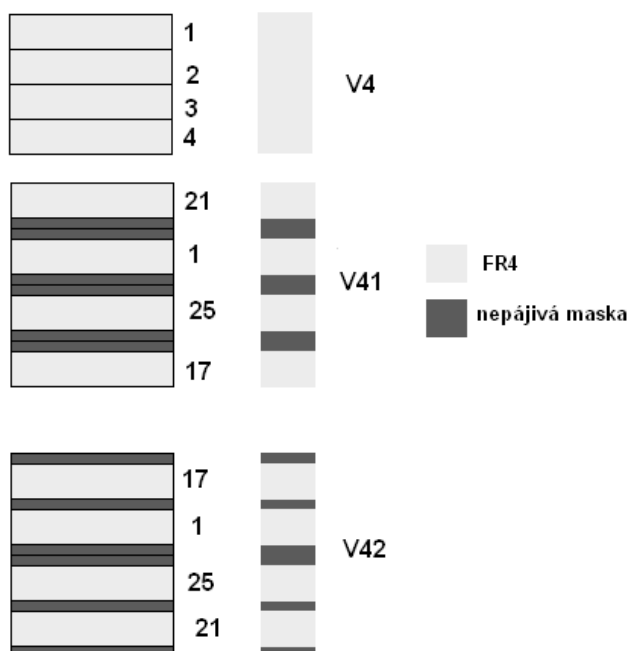
Obr. 5.13: Vliv vzduchové mezery a okolní nepájivé masky



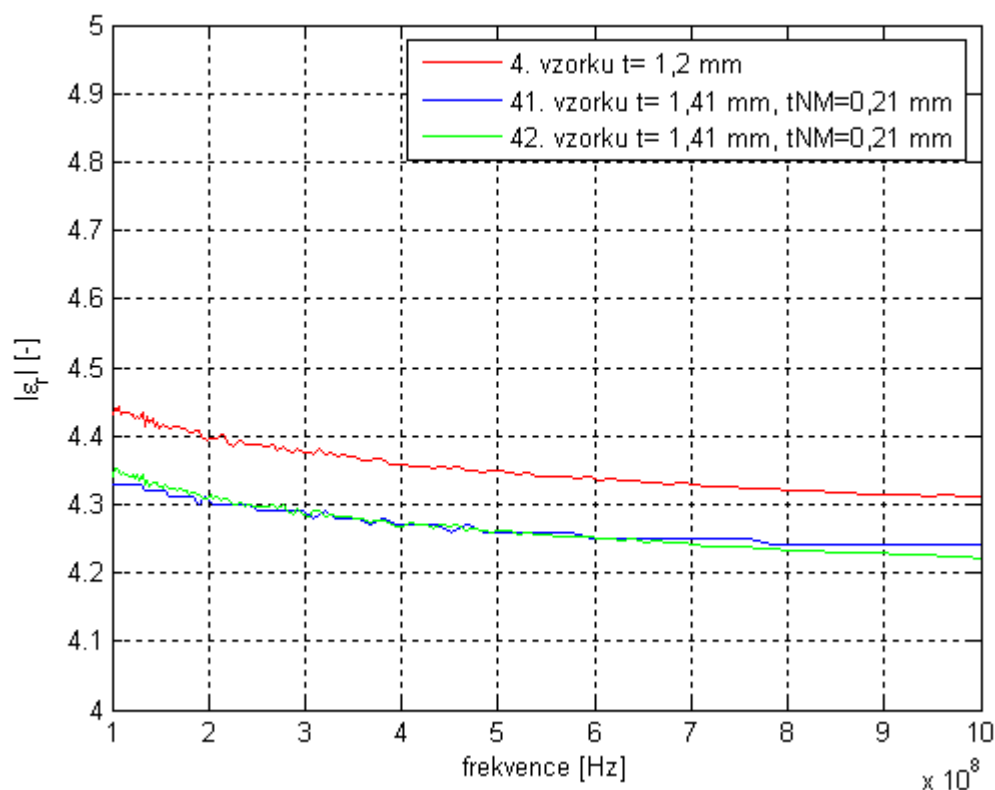
Obr. 5.14: Rozmístění vrstev dielektrik při zkoumání vlivu tloušťky nepájivé masky



Obr. 5.15: Vliv tloušťky nepájivé masky

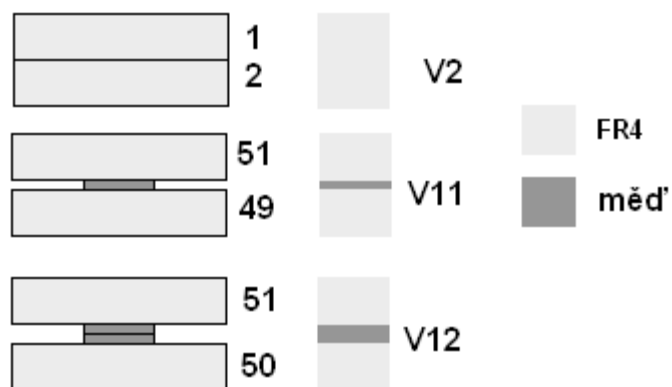


Obr. 5.16: Rozložení dielektrik při zkoumání vlivu rozmístění nepájivé masky

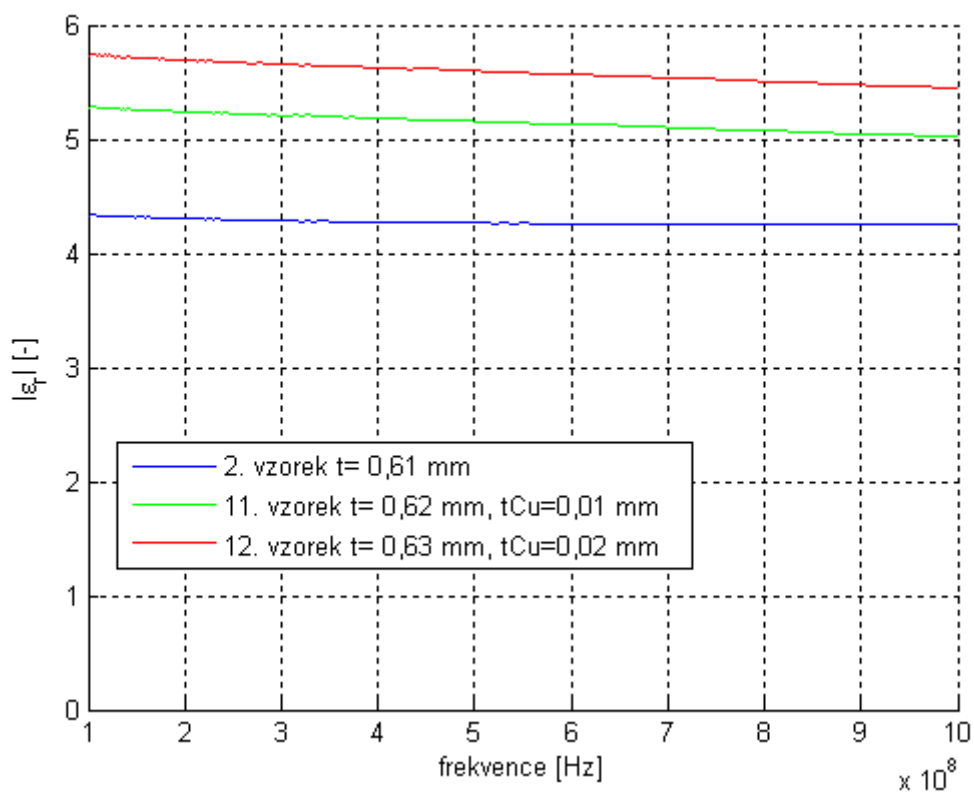


Obr. 5.17: Vliv rozmístění vrstev nepájivé masky na měření

Jako poslední jsem zkoumal vliv vrstvy mědi na $|\epsilon_r|$. Přidáním vrstvy mědi by mělo dojít ke znatelnému zvýšení. Na měď byla nanесena slabá vrstva zlata tzv. zlacení z důvodu ochrany povrchu mědi před vlivem prostředí. Následující obrázek Obr. 5.18 ukazuje umístění jednotlivých vrstev dielektrik. Na Obr. 5.19 je vidět, že vrstva mědi o tloušťce 0,01 mm zvětší $|\epsilon_r|$. Při dvojnásobné vrstvě mědi dojde ke zvýšení, které není dvojnásobné, oproti vzorku 2.



Obr. 5.18: Rozložení vrstev při zkoumání vlivu mědi



Obr. 5.19: Vliv tloušťky mědi na měření $|\epsilon_r|$

Zhodnocení experimentální metody

Při měření experimentální metodou jsme zjistili, že je lepší používat maximálně pět vrstev, jinak může dojít k ovlivnění výsledků vlivem vzduchových mezer mezi jednotlivými vrstvami. Toto ovlivnění ale není příliš velké. Celková tloušťka dielektrika by neměla přesáhnout 2 mm za předpokladu, že máme více vrstev, protože jinak dojde k ovlivnění výsledků vlivem rozptylu pole a jak se ukázalo, tak ovlivnění může být poměrně velké až 10%. Za předpokladu že budu používat tuto metodu tak bych měl zajistit, aby dielektrikum okolo měřící elektrody bylo stejné jako mezi elektrodami viz. Obr. 5.12. Jak je vidět, změna není sice velká, ale naskytuje se zde otázka, co by se stalo, kdyby byl kolem materiál s velmi rozdílnou permitivitou a velké tloušťce. Jako velkou výhodou se ukázala možnost záměny pořadí jednotlivých vrstev dielektrika bez ovlivnění měření. Díky této skutečnosti mohu říci, jaká bude $|\epsilon_r|$ např. při nanesení vrstvy mědi na povrch nosného materiálu FR-4. V opačném případě by to nebylo možné, protože nemohu měřit měď na povrchu materiálu. Je to kvůli tomu, že bych změnil plochu elektrod, a proto by měření bylo znehodnocené. Metoda vyžaduje náročnou přesnost na dodržení správné tloušťky mezi elektrodami a sílu, kterou přitlačuji elektrodami. Pokud bych nastavil špatně tloušťku tak nastanou dvě možnosti. Za první vznikne vzduchová mezera mezi elektrodou a povrchem vzorku a dojde tak ke snížení naměřené hodnoty nebo k deformaci vzorku a tím k ovlivnění jeho permitivity. Vzhledem k tomu, že jsem použil mikrometr s přesností 0,001 mm a přípravek, který slouží k přesnému nastavení vzdálenosti mezi elektrodami, tak tento problém nehrozí. Musíme ale počítat s tím, že je to časově náročné. Dále se ukázalo, že se příliš nehodí k měření materiálů s extrémně malým $\tan \delta$ v důsledku kalibrace, která vychází z toho, že PTFE má $\epsilon_r'' = 0$. Jak se ale ukázalo, tak tomu tak není a hodnota $\tan \delta$ kolísá. To je vidět na obr. 5.6. Nedozevíme se tak přesný $\tan \delta$, ale měření $|\epsilon_r|$ a ϵ_r' to významně neovlivní. Tento fakt nám udává přesnost měření, která je ale u každého vzorku a měření jiná, protože je nepravděpodobné že se nám podaří kalibrovat přístroj vždy úplně stejně.

Závěr

Tato bakalářská práce stanovila princip měření komplexní permitivity jednoduchých a vrstvených dielektrik pro správné měření analyzátozem Agilent E4991A. V první části práce je shrnuta teorie o vlastnostech a rozdělení materiálů, které se v dnešní době používají k výrobě DPS. Na základě zjištěných poznatků je stanovena podmínka přípravy vzorových etalonů pro měření. Mezi nejdůležitější patří teplota, která byla 23°C a 50% vlhkost vzduchu.

Dále se seznámíme s teorií měření komplexní permitivity, kde je uvedena kapacitní metoda. Tuto metodu využijeme jak pro měření jednoduchých etalonů, tak i pro experimentální metodu měření vícevrstevných dielektrik. Velmi důležitou částí práce je i seznámení se s použitím analyzátozem, protože právě jeho pochopení nám zaručí, že dodržíme všechny zásady správného měření. Nevýhodou kapacitní metody je omezení jejího použití pouze do 1 GHz. To vyplývá z faktu, že nad touto frekvencí se začíná projevovat parazitní indukčnost a tak náhradní obvod, který je při kapacitní metodě využíván již není platný. Metoda je velmi náročná na přípravu vzorků pro měření a na dodržení správné tloušťky mezi elektrodami. Jak se ukázalo, největší ovlivnění výsledků nastává při větší celkové tloušťce vrstveného dielektrika o velkém počtu vrstev. V práci je zkoumán jak vliv nepájivé masky na celkovou absolutní relativní permitivitu, tak vliv mědi a vzduchu mezi vrstvami.

Literatura

- [1] COOMBS C. F. *Printed circuits Handbook*. (Fifth edit.). New York: McGraff-Hill publishing, 2001. 1400 s. ISBN-0-07-135016-0
- [2] www-cube.cz [online].2011 [cit. 2011-05-15]. Webová prezentace firmy CUBE CZ s.r.o.. odkaz Technologické možnosti výroby. Dostupné z WWW:<<http://www.cube.cz/technicke-moznosti.htm>>
- [3] KNĚBORT, Petr. *Nové technologie výroby DPS*. Liberec, 2010. 25 s. Ročníkový projekt. TUL, FM, MTI.
- [4] MAYER, Daniel. *Teorie elektromagnetického pole*. 1. Plzeň: Vydavatelství ZČU, 1996. 317 s.
- [5] KUNC, Štěpán. *Měření komplexní permitivity materiálů pomocí vrstvených dielektrik*. Liberec, 2010. 69 s. Diplomová práce. TUL, FM, MTI.
- [6] Agilent E4991A RF Impedance/Material Analyzer, Operation Manual, 495 s.
- [7] Agilent Solutions for Measuring Permittivity and Permeability with LCR Meters and Impedance Analyzers, 28 s.
- [8] BARTSCH, Hans - Jochen. *Matematické vzorce*. 3, revidované. Praha: Mladá fronta, 2002. 832 s.

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Znázornění testu pevnosti v ohybu	13
Obr. 2.2: Povrch kolem díry před a po povrchové úpravě [1]	20
Obr. 3.1: Vektorový diagram komplexní permitivity a elektrické indukce	23
Obr. 3.2: Náhradní schéma kondenzátoru	24
Obr. 3.3: Kondenzátor s dvouvrstvým dielektrikem	27
Obr. 3.4: Náhradní schéma kondenzátoru s dvouvrstvým dielektrikem	28
Obr. 4.1: Fotografie analyzátoru E4991A RF Impedance/Material	30
Obr. 4.2: Zařízení 16453A pro měření dielektrických vlastností materiálu	31
Obr. 4.3: Elektrody zařízení 16453A	32
Obr. 4.4: Chyba vzduchové mezery [7]	33
Obr. 4.5: Vliv chyby vzduchové mezery na hodnoty měření [7]	34
Obr. 4.6: Okrajová kapacita	35
Obr. 4.7: Model chyby zařízení 16453A	35
Obr. 5.1: Propojení analyzátoru E4991A a testovací hlavice	38
Obr. 5.2: Měření tloušťky vzorku	39
Obr. 5.3: Zařízení pro odměřování vzdálenosti elektrod	40
Obr. 5.4: Vkládání vzorku mezi měřicí elektrody	41
Obr. 5.5: Obrázek grafu závislosti absolutní relativní permitivity na frekvenci	42
Obr. 5.6: Srovnání absolutní permitivity desky s úpravou a bez úpravy	43
Obr. 5.7: Ztrátový činitel kalibrační destičky z PTFE	44
Obr. 5.8: Graf reálné části komplexní permitivity kalibrační destičky	45
Obr. 5.9: Graf vlivu počtu vrstev dielektrika na absolutní relativní permitivitu	46
Obr. 5.10: Vliv tloušťky vrstvy vzduchu mezi vrstvami na měření	47
Obr. 5.11: Vliv vzduchové mezery mezi dielektriky	47
Obr. 5.12: Rozmístění vrstev dielektrika při zkoumání vlivu vzduchové mezery	48
Obr. 5.13: Vliv vzduchové mezery a okolní nepájivé masky	49
Obr. 5.14: Rozmístění vrstev dielektrik při zkoumání vlivu tloušťky nepájivé masky	49
Obr. 5.15: Vliv tloušťky nepájivé masky	50
Obr. 5.16: Rozložení dielektrik při zkoumání vlivu rozmístění nepájivé masky	50
Obr. 5.17: Vliv rozmístění vrstev nepájivé masky na měření	51

Obr. 5.18: Rozložení vrstev při zkoumání vlivu mědi	52
Obr. 5.19: Vliv tloušťky mědi na měření $ \epsilon_r $	52

Seznam tabulek

Tab. 2.1: Teplota skelného přechodu a koeficient tepelné roztažnosti	12
Tab. 2.2: Hodnoty vybraných materiálů zjištěných při testu T260	12
Tab. 2.3: Teplota rozkladu u různých materiálů	13
Tab. 2.4: Změna celkové hmotnosti po testu na chemickou odolnost	14
Tab. 5.1: Srovnání naměřených hodnot s údaji poskytnutých od výrobce	41

Obsah CD

- Text bakalářské práce ve formátu .PDF
- Naměřená data ve formátu .PDF